

препринт

И.В. АЛЕКСАНДРОВА, С.В. БАЗДЕНКОВ, А.А. БЕЛОЛИПЕЦКИЙ, Е.Р. КОРЕШЕВА, Е.Л. КОШЕЛЕВ, И.Е. ОСИПОВ, Л.В. ПАНИНА, Т.П. ТИМАШЕВА, В.И. ЩЕРБАКОВ, Л.С. ЯГУЖИНСКИЙ

КРИОГЕННЫЕ МИШЕНИ ДЛЯ РЕАКТОРА

ЧАСТЬ III

МЕТОД FST: ФОРМИРОВАНИЕ ТВЕРДОГО ВОДОРОДНОГО ТОПЛИВА ВНУТРИ ДВИЖУЩЕЙСЯ СФЕРИЧЕСКОЙ ОБОЛОЧКИ

МЕТОД FST:

формирование твердого водородного топлива внутри движущейся сферической оболочки

И.В.Александрова, С.В.Базденков, А.А.Белолипецкий, Е.Р.Корешева, Е.Л.Кошелев, И.Е.Осипов, Л.В.Панина², Т.П.Тимашева, В.И.Щербаков, Л.С.Ягужинский³

Физический институт им. П.Н.Лебедева РАН, Москва ¹Вычислительный Центр им. А.А.Дородницына РАН, Москва ² Национальный Исследовательский Технологический Университет, Москва ³Институт Физико-Химической Биологии им. А.Н.Белозерского, Москва



«Наш мир погружен в огромный океан энергии… Перед нами грандиозная задача — найти способы добычи этой энергии. Тогда, извлекая ее из этого неисчерпаемого источника, человечество будет продвигаться вперед гигантскими шагами » - Никола Тесла, 1891 г.

Аннотация

Формирование и доставка криогенных топливных мишеней с высокой частотой является непременным условием построения фабрики мишеней для обеспечения работы реактора на основе управляемого инерциального термоядерного синтеза (ИТС).

Одним из ключевых моментов при построении такой фабрики является выбор эффективного метода частотного формирования криогенных топливных мишеней и построение соответствующего устройства для их производства (так называемый, модуль формирования). При этом, безусловно, мишени должны быть бесподвесными (т.е. свободными от какого-либо подвеса). Кроме того, крайне остро стоит проблема получения криогенного слоя топлива с заданной микроструктурой, позволяющей удовлетворить высоким критериям качества, а именно: отклонения от сферичности и концентричности должны составлять не более 1%, а локальные неоднородности на поверхности топливного слоя не должны превышать 1 мкм во всех модах. Поэтому, в программе ИТС проведение широкого спектра исследований в области формирования криогенного слоя с различной структурой топлива, изучение отклика этой структуры на вариацию тепловых и механических нагрузок, включая отклик на прохождение ударной волны, является ключевым моментом при выборе реакторных технологий.

Перспективным путем решения поставленных задач является реализация метода FST, предложенного и разработанного в Физическом институте им. П.Н.Лебедева (ФИАН). В настоящей работе будут представлены основные результаты, достигнутые ФИАН на данный момент развития программы по FST- формированию криогенных мишеней, включая мишени реакторного класса.

СОДЕРЖАНИЕ

		Стр.		
Введение	Перспективные задачи технологии реакторных мишеней	5		
Глава 1.	Ультрадисперсные криогенные слои	7		
§1.	Структуризация топливного слоя	7		
§2.	Постановка задачи	8		
§3.	Сравнительный анализ способов получения и стабилизации ультрадисперсного состояния вещества	9		
§4.	Получение термостойкого ультрадисперсного криогенного слоя 4.1. Условия эксперимента 4.2. Ультрадисперсный слой на основе смесей H ₂ /HD 4.3. Ультрадисперсный слой на основе смеси D ₂ с различными легирующими добавками 4.4. Выводы	13		
§5.	Природа «водородного стекла» 5.1. Методология 5.2. Деградация «водородного стекла»: кристаллизация или структурная релаксация? 5.3. Анализ экспериментальных результатов	26		
§6.	Влияние вибраций на структуру криогенного слоя	34		
§7.	Тепловое разрушение криогенного слоя			
§8.	Рекомендации по выбору оптимальной структуры криогенного слоя	38		
	Заключение к Главе 1	40		
	Литература к Главе 1	42		
	Приложение к Главе 1 Экспериментальный FST-комплекс	46		
Глава 2	FST- формирование криогенного слоя топлива в движущейся бес- подвесной оболочке: теория, эксперимент, конструирование	62		
§1.	 Разработка базовой модели процесса FST - формирования 1.1. Вводные замечания 1.2. Перенос тепла в одномерной сферически-симметричной модели. Решение задачи Стефана для случая вымораживания топливного слоя внутри полой оболочки, когда способ отвода тепла из мишени может варьироваться в соответствии с условиями эксперимента за счет изменения внешнего граничного условия. 	66		

1.3. Сравнительный анализ полученных результатов

93

120

127

132

139

- 1.3.2. Умеренный отбор тепла. Метод FST.
- 1.3.3. Резюме: структурно- чувствительные методы и метод FST
- §2. Криогенные мишени класса OMEGA для энергии лазера $E_1 = 30$ кДж
- §3. Криогенные мишени класса HiPER для энергии лазера E_1 =200 кДж (v \ge 1Гц) 95
 - 3.1. Заполнение массива бесподвесных оболочек D₂ и DT топливом
 - 3.2. Разгерметизация мишенного контейнера
 - 3.3. Формирование топливного слоя по методу FST
 - 3.3.1. Особенности перехода к DT топливу

3.3.2. Формирование слоя в мишени класса HiPER с оболочкой, состоящей из двух полимерных слоев: внешнего компактного слоя и внутреннего пористого слоя

3.3.3. Влияние дополнительного источника нагрева на время формирования криогенной мишени (собственный β-распад трития в DT смеси)

3.3.4. Механическая устойчивость мишени класса HiPER при ее инжекции в тестовую камеру

- 3.4. Модуль формирования для мишеней класса HiPER
- 3.5. Резюме: результаты экспертного анализа для мишеней класса HiPER

§4. Мишени реакторного в	класса
--------------------------	--------

- 4.1. Классические реакторные мишени
- 4.2. Критическая мишень
 - 4.2.1. Мишень с твердым ультра дисперсным слоем топлива
 - 4.2.2. Мишень с топливом, находящимся в критическом состоянии

Заключение к Главе 2

Литература к Главе 2

Приложения к Главе 2

- 1. Свойства материалов
- 2. Геометрическое пятно контакта
- 3. Тепловое пятно контакта
- 4. Фазовое состояние топлива перед началом FST-формирования твердого криогенного слоя внутри полой сферической оболочки
- 5. Метод фононной модуляции структуры
- 6. Геометрия канала формирования для мишеней класса HiPER
- 7. Конструирование FST- модуля для поточного производства криогенных топливных мишеней класса HiPER

ЗАКЛЮЧЕНИЕ



Группа Криогенных мишеней (ФИАН): Е.Р. Корешева, И.Е. Осипов, И.В. Александрова



В лаборатории: И.Е.Осипов, Е.Л.Кошелев, А.И.Куприяшин



Совещание по проекту МНТЦ №1557: И.В. Александровна, И.Д.Тимофеев, А.А. Белолипецкий, Я.Изава, Г.Д.Баранов, Т.П. Тимашева, Е.Р. Корешева



Совещание участников проекта МНТЦ №3927 из ФИАН и ОАО «Красная Звезда»: И.Е.Осипов, А.И Никитенко, В.А.Калабухов, Е.Л.Кошелев, И.Д.Тимофеев, Г.С.Усачев



Участники 3-го Московского совещания по мишеням и их применению (3rd MWTA) в гостях у Елены Корешевой



Коллаборатор проекта МНТЦ №1557, проф. Такаеши Норимацу, с визитом в группе Криогенных мишеней: Г.Д Баранов, И.Е.Осипов, Е.Р.Корешева, Т.Норимацу, Л.С.Ягужинский

Введение

Перспективные задачи технологии реакторных мишеней

Для обеспечения непрерывного режима генерации энергии, подача топлива в центр камеры реактора ИТС и одновременная подача туда лазерного излучения должны осуществляться с частотой 1-15 Гц.

Мишени с криогенным слоем топлива должны изготавливаться вне камеры реактора на специальной «Фабрике мишеней». Для того чтобы обеспечить поступление топлива в реакторную камеру с требуемой частотой, производство мишеней должно достигать $\sim 10^5 \div 10^6$ штук в сутки. Это требует перехода от технологии создания единичных мишеней (традиционные технологии) к технологии массового производства бесподвесных реакторных мишеней в условиях минимизации расхода трития. Последнее достигается при минимизации временных и пространственных характеристик каждого производственного шага, в частности, при минимизации времени формирования мишеней. Полученный топливный слой должен не только отвечать жестким критериям качества, но и сохранять их в процессе доставки, что ставит перед технологией дополнительную задачу - получение долговечного слоя, т.е. слоя с устойчивыми характеристиками качества.

Как отмечалось во введении, традиционные технологии формирования криогенного слоя значительной толщины не удовлетворяют ни одному из перечисленных требований. Прежде всего, традиционный подход связан с получением изотопов водорода в равновесном кристаллическом состоянии [1]. С точки зрения требований к производству мишеней для мощных лазерных установок и реактора, данный подход имеет два существенных недостатка:

- 1. Работа с единичной мишенью, укрепленной на специальном держателе, что в принципе исключает перспективу частотной инжекции мишени в камеру реактора.
- 2. Длительное время формирования слоя от 5 до 24 часов. Как следствие, мы имеем
- большой расход трития в мишенной системе;
- появление дефектов в объеме DT-слоя (пузырьки гелия-3, выделяемые в процессе бетараспада трития), а, следовательно, снижение прочности слоя и его качества;
- появление разномассовости в отдельных областях слоя за счет процесса разделения компонентов DT-смеси.

В связи с этим, в период 2000-2005 гг. в США и Японии были сделаны попытки перейти на новые технологии, к которым относятся метод «Fluidized bed» [2] и метод «Foam layering» [2,3].

Метод «Fluidized bed» заключается в том, что массив незакрепленных оболочек подвешивается в потоке газообразного гелия. Охлаждение оболочек и образование слоя происходит за счет постепенного снижения температуры гелия. Предполагается, что топливный слой в момент перехода через тройную точку должен охлаждаться достаточно медленно, чтобы сформировался прозрачный кристаллический слой. Хотя данный метод и позволяет работать с массивом оболочек, однако длительное время формирования приводит к сравнительно большому расходу трития в мишенной системе, что недопустимо. Кроме того, данный метод до сих пор еще не удалось продемонстрировать экспериментально. Другой подход, который изучается в лабораториях США и Японии – формирование слоя за счет его распределения внутри пористой стенки топливной капсулы, т.е. метод "Foam layering". Применение пористой капсулы позволяет удерживать жидкий или твердый топливный слой в равнотолщинной конфигурации при условии, что поры не пересыщены. Однако, согласно расчетам [4], для эффективной реализации схемы ИТС, необходимо, чтобы пористый слой был именно пересыщен, причем толщина топлива, свободного от пор, должна достигать не менее 280 мкм. Таким образом, наличие пористой стенки не снимает проблему симметризации слоя.

С 2010 года в США исследуется новый сценарий производства криогенных мишеней, отличительные особенности которого следующие [5]:

1. Использование эффекта капиллярного электрофореза для управления процессами получения пористой капсулы и формирования внутри нее топливного слоя. Заметим, что и в США и в Японии эффект капиллярного электрофореза в настоящее время используется в технологии массового производства полимерных оболочек с пористой стенкой [6].

2. Нанесение внешнего защитного покрытия из твердого неона или ксенона на пористую капсулу; такое покрытие играет роль барьера для жидкого топлива в процессе формирования слоя, а также защищает топливный слой от перегрева при полете мишени внутри камеры реактора.

Отметим, что на сегодняшний день ни один из перечисленных выше подходов так и не принес обнадеживающих результатов в решении проблемы массового производства бесподвесных криогенных мишеней.

Альтернативой к перечисленным способам формирования топливного слоя является метод *FST* (Free-Standing Targets или бесподвесная мишень), развиваемый в ФИАН с 1989 года. Поскольку в основу метода положен принцип работы с движущимися бесподвесными оболочками, FST позволяет непрерывно (или с необходимой частотой) формировать криогенные мишени [7,8]. При этом время формирования одной мишени не превышает 15 секунд, что позволяет существенно снизить запасы трития в мишенной системе по сравнению с традиционными методами.

В настоящей работе представлено теоретическое и экспериментальное обоснование сформулированной авторами оригинальной концепции получения сферически-симметричного криогенного слоя топлива за счет беспорядочного вращения движущейся сферической оболочки и ее охлаждения через перемещающееся пятно контакта (метод FST). Показано, что сочетание оптимальных условий симметризации слоя с условиями его диспергирования в присутствии примесей (легирующих добавок) более высокоплавких изотопов водорода, позволяет сформировать топливный слой в ультрадисперсном состоянии, устойчивый в широком температурном диапазоне (от 5 К до тройной точки применяемого топливного вещества). Это позволит не только решить проблему формирования качественного слоя, но также проблему сохранения этого качества при доставке криогенных мишеней в зону термоядерного горения.

Глава 1. Ультрадисперсные криогенные слои

§1. Структуризация топливного слоя

В работе [9] сформулировано следующее положение, необходимое для дальнейшего изложения материала: «ультрадисперсные материалы» включают все конденсированные системы, чей дисперсный компонент настолько мал в одном, двух или во всех трех измерениях (< 100 нм), что геометрический размер морфологического элемента (частица, кристаллит, зерно, пора...) становится соизмеримым с характеристическим корреляционным масштабом какого-либо физического явления или характерной длиной какого-нибудь транспортного процесса в этом веществе (размер электрического или магнитного домена, длина свободного пробега электронов, длина волны фононов, дислокация или дисклинация и т.д.).

Отметим, что для криогенных мишеней характерными масштабами такого физического явления как формирование топливного слоя являются следующие величины: толщина самого слоя (не менее 200 мкм для реакторных мишеней) и локальные неоднородности на его поверхности (не должны превышать 1 мкм во всех модах) [10]. В этом случае можно воспользоваться уточненной классификацией ультрадисперсности, предложенной в работе [11]: *субмикронный диапазон (d = 0.1 - 0.3 мкм), нано кристаллический диапазон (d < 100 нм), аморфное состояние (характерный размер параметра порядка ~ 1 нм)*. Очень часто, для субмикронного диапазона используется термин мелкозернистая структура. Таким образом, термин *«ультрадисперсный слой»* относится к состоянию топлива, которое характеризуется малой длиной упорядоченности микроструктуры, т.е. малым размером зерна *d*, и благодаря этому обладающий качественно новыми свойствами, в том числе заданными функциональными и эксплуатационными характеристиками.

К главным физическим причинам особенностей поведения ультрадисперсных материалов можно отнести три: ограничение действия законов классической физики из-за малого размера, значительный рост удельной поверхностной энергии и, наконец, экстремальные условия синтеза. По этим причинам, данные материалы находятся в неравновесном состоянии, когда могут реализовываться

- нестабильные (метастабильные) структуры типа фуллеренов, нанотрубок и пр.

- высокотемпературные фазы (алмаз, кубический оксид циркония);

- структурная, концентрационная или фазовая неоднородности по радиусу наночастицы и пр.

Согласно критерию Л.Д. Ландау [12], наноматериалы занимают промежуточное положение между кристаллами и аморфными веществами. Степень неравновесности необходимо учитывать качественно и количественно при разработке, хранении и применении наноматериалов.

Отметим, что вопрос необходимости применения наноматериалов в базовых элементах реактора ИТС (стенка реакторной камеры, активная среда лазерного усилителя, оболочка топливной мишени) неоднократно поднимался на совещаниях МАГАТЭ (см., например, [13]). Что касается криогенного топливного слоя, то в работе [14] было предложено развивать нано- технологии на основе метода FST.

Обоснованность интенсивного развития нанотехнологий в программе ИТС подтверждается результатами теоретических исследований, проведенных в Ливерморской группе (США) [15,16] с целью оптимизации эффективности сжатия в схеме ИТС. Эти работы показали, что все элементы мишени, предназначенной для экспериментов на установке NIF, должны представлять собой изотропные нанокристаллические (т.е. ультрадисперсные) среды, поскольку только в этом случае вероятность искажения фронта ударной волны в процессе имплозии мишени минимальна. Приведем соответствующую фразу из работы [16]:

"We present non-equilibrium molecular dynamics simulations of wave propagation in nanocrystals. We find that the width of the travelling wave front increases with grain size, d, as $d^{1/2}$. (...) our results clearly show that nano-crystalline NIF targets would guarantee small fluctuations in the shock front, decreasing the probability for unwelcome instabilities."

Таким образом, для минимизации риска разрушения мишени в процессе ее доставки и повышения эффективности сжатия топлива по схеме ИТС необходимо, чтобы криогенный топливный слой находился в изотропном ультрадисперсном состоянии. Поиск условий получения топливного слоя именно в этом состоянии (включая аморфное и нано-кристаллическое) является важнейшей задачей технологии криогенных мишеней.

§2. Постановка задачи

В процессе ускорения, инжекции и полета мишени в камере она подвергается механическим и тепловым нагрузкам, вследствие которых может наступить разрушение топливного слоя. Понятие разрушения в данном случае включает:

(a) Искажение качества слоя: увеличение разнотолщинности и шероховатости свободной поверхности сверх допустимых норм, что происходит, в основном, вследствие массопереноса твердого топлива под действием разности температур, а также вследствие процесса рекристаллизации; нагрев криогенного слоя сверх допустимого уровня.

(б) Механическое разрушение твердого слоя как целого: растрескивание слоя под действием перегрузок и температурных напряжений, возникающих, во-первых, вследствие низкой прочности материала и, во-вторых, вследствие анизотропии его прочностных свойств.

Таким образом, долговечный топливный слой должен обладать такими свойствами, как термостойкость и механическая прочность.

В равновесном состоянии твердые изотопы водорода представляют собой анизотропную среду (кристаллические диэлектрики). Проявлением анизотропии является, например, зависимость скорости распространения звука от направления [17]. Согласно теории Дебая, коэффициент решеточной теплопроводности прямо пропорционален значению скорости звука в кристаллических диэлектриках. По этой причине, даже в условиях симметричного теплопритока на мишень, внутренняя поверхность кристаллического топливного слоя не является изотермической, что приводит к появлению искажений слоя в высоких и низких гармониках (т.е. к образованию разнотолщинности и локальных неоднородностей). Если же топливный слой представляет собой изотропную среду, данный механизм теплового разрушения слоя не реализуется.

Существует два принципиально различных пути получения высокопрочных материалов. Первый – создание бездефектной кристаллической структуры; второй – создание предельно неупорядоченной структуры [18,19]. На Рис.1.1, взятом из [18], показана зависимость прочности материала от количества дефектов кристаллической структуры с учетом возможных отклонений в области высокой концентрации дефектов.



Рис.1.1. Схема зависимости прочности (σ) от количества дефектов (п) кристаллической структуры с учетом возможных отклонений в области высокой концентрации дефектов (из работы [18])

Получение бездефектных макрокристаллов практически не реализуемо. При накоплении дефектов, прочность кристалла сначала резко падает (участок А-Б на Рис.1.1). Причиной такого поведения является анизотропия прочностных свойств кристалла и, в частности, наличие в нем выделенных плоскостей легкого скольжения дислокаций. В аморфных, мелкозернистых и других ультрадисперсных средах, отличающихся высокой плотностью дефектов (n), естественные плоскости скольжения отсутствуют и прочность материала возрастает пропорционально n (область Б-С на Рис.1.1). По данным работы [18], увеличение прочности можно ожидать вплоть до плотности дислокаций, оцениваемой величиной 10¹³см⁻², после достижения которой при дальнейшем увеличении концентрации

дефектов должно наступать разупрочнение материала вследствие нарушения его сплошности.

Таким образом, перспективным путем повышения устойчивости топливного слоя по отношению к тепловым и механическим воздействиям, является его формирование в изотропном ультрадисперсном (аморфном или нанокристаллическом) состоянии. Этот вывод подтверждается результатами, полученными в [14,20].

§3. Сравнительный анализ способов получения и стабилизации ультрадисперсного состояния вещества

Оценим принципиальную возможность получения твердых изотопов водорода в аморфно-нанокристаллическом состоянии.

Известно, что параметр $\varepsilon = \Delta U/kT_m$ характеризует склонность вещества к стеклообразованию (здесь ΔU – энергия активации диффузии, k – постоянная Больцмана, $T_m \approx (0.95 \div 0.65)T_{nn}$ – температура, при которой скорость образования зародышей кристаллизации в расплаве максимальна, T_{nn} – температура плавления вещества). Вещества, легко образующие стекла, обычно имеют значение параметра аморфизации $\varepsilon > 20 \div 25$, в то время как для металлических расплавов, не образующих стекол, $\varepsilon \approx 2$. Изотопы водорода занимают промежуточное положение в этой классификации, причем по параметру ε они даже ближе к хорошим стеклообразователям. Действительно, отношение $\Delta U/k$ для водорода составляет 175÷280 K,

для дейтерия - 276÷336 К (данные для DT отсутствуют) [21]. Соответствующие параметры аморфизации составляют:

 $\varepsilon > 12.6 \div 20$ для H₂ (T_{тр} = 13.9 K), $\varepsilon > 14.8 \div 18$ для D₂ (T_{тр} = 18.65 K).

Важным параметром процесса стеклования вещества является темп охлаждения расплава (q). Из кинетической теории аморфизации следует, что в расплаве не успеет образоваться ни один зародыш кристаллизации в том случае, если темп охлаждения удовлетворяет соотношению [22]:

$$q > \left(\frac{\pi^{2}kT_{rp}(1-\chi)^{3}\beta z'L}{8\alpha R\gamma\chi h}\right) \exp(-\Delta U/kT_{m})$$
(1.1)

где $\chi = T_m/T_{rp} = \{ [\epsilon(\epsilon+6)+1]^{1/2} - (\epsilon-1) \}/2; \alpha, z', \beta$ - кинетические коэффициенты; R - универсальная газовая постоянная; γ - относительное пересыщение; h - постоянная Планка; L - скрытая теплота плавления.

Для хороших стеклообразователей требуемый темп охлаждения q < 100 К/сек, в то время как для металлов q может превышать $10^4 \div 10^{10}$ К/сек. По нашим оценкам, изотопы водорода могут быть аморфизованы при темпе охлаждения q ~ 100 К/сек.

В научной литературе имеются некоторые данные по условиям получения твердых слоев из изотопов водорода в неравновесном мелкозернистом состоянии. Например, в работе Коллинза [23] экспериментально показано, что размер кристаллических зерен твердого водорода уменьшается при увеличении скорости роста слоя, а также при снижении температуры подложки. В частности (см. Рис.1.2), при увеличении скорости роста от 0.4 мкм/час до 22 мкм/час характерный размер зерна получаемого слоя уменьшается от 70 до 2.5 мкм (при температуре подложки ~ 4 K).

В экспериментах Миллера по скоростному вымораживанию D_2 и DT на внутренней поверхности стеклянных оболочек методом FIF [24], при температуре стенки 4.2÷6 К были достигнуты скорости роста слоя 5 мкм/сек (или 18000 мкм/час), т.е. на ~3 порядка выше, чем в экспериментах Коллинза. Скорость охлаждения топлива при этом составила q > 100 К/сек. Получаемый твердый криогенный слой был прозрачным.



Рис.1.2. Зависимость среднего размера зерна от скорости охлаждения водорода и температуры подложки (взято из [23])

Из сравнения приведенных результатов можно предположить, что размер зерен в слоях, полученных Миллером, составляет менее 150 Å, т.е. слой находится в ультрадисперсном (аморф-ном-нанокристаллическом) состоянии.

Авторы данной работы воспроизвели эксперименты Миллера и получили сходные результаты для D₂, H₂ и ряда других веществ [25,26]. Чтобы подтвердить гипотезу об аморфнонанокристаллической природе получаемого прозрачного слоя, мы исследовали его поведение при нагреве от 4.2 К до температуры плавления (T_{тр}).

Схема эксперимента по реализации скоро-

стной переконденсации кристаллического слоя внутри оболочки методом FIF показана на Рис.1.3.

Метод состоит в следующем:

1. Размещение оболочки, заполненной изотопом водорода, в камере с теплообменным гелием и ее охлаждение ниже 6 К. В конце этого этапа на внутренней стенке оболочки образуется крупнозернистый кристаллический слой.

2. Кратковременный нагрев топлива с помощью импульсного источника тепла выше темпера-

туры испарения изотопа с последующей его конденсацией на холодной стенке оболочки с образованием однородного прозрачного слоя.

В качестве импульсного источника тепла в наших экспериментах применялся миниатюрный нагреватель мощностью 2 Вт из нихромовой проволоки диаметра 0.08 мм, размещенный вблизи оболочки с криогенным слоем в тест-камере криоста-



Рис.1.3. Схема эксперимента по реализации метода FIF.

1- оболочка, 2- капилляр, 3- клей, 4- камера с теплообменным гелием, 5нихромовый нагреватель, 6- абсолютная термопара Сu/Cu+Fe, 7- дифференциальная термопара Cu/ Cu+Fe, 8- медный экран

та (см. Рис.1.3). Тест-камера была заполнена теплообменным гелием под давлением 1 атм, либо жидким гелием при T=4.2 К.

Достигнутые в системе скорости охлаждения ($q \ge 100$ К/сек) позволяли получить внутри оболочки прозрачный слой на основе твердых изотопов водорода, если его толщина не превышала 15 мкм^{*}. Поведение полученного слоя было аналогично поведению аморфных и нанокристаллических пленок: при нагреве прозрачного слоя выше некоторой пороговой температуры T_a , происходила его необратимая кристаллизация.

Экспериментально обнаруженные значения пороговой температуры T_a для всех исследованных веществ даны в Таблице 1.1. Как следует из таблицы, величина T_a может изменяться от ~ $0.4T_{Tp}$ до ~ $0.5T_{Tp}$, т.е. находится в тех же пределах, которые обнаружены для аморфных пленок металлов, сплавов и полупроводников [27].

В соответствии с задачей настоящей работы, важным моментом является подтверждение возможности формирования ультрадисперсного слоя внутри незакрепленных движущихся оболочек, которое и было выполнено экспериментально при использовании метода FST.

Эксперименты показали, что скорость охлаждения расплава из изотопов водорода *Таблица 1.1. Верхняя граница температуры Т_a существования прозрачного*

слоя, полученного по метобу скоростной переконоенсиции						
Мате	ериал					
слой оболочка		Τ _{тр} , К	T _a , K	T_a/T_{Tp}		
n-H ₂ Стекло		13.9	6.0±1.0	0.43		
n- D ₂	Стекло	18.65	9.0±1.0	0.48		
H_2/D_2	Стекло	15.8÷16.4	8.0±0.8	0.49-0.51		
(50/50)						
Ne	Стекло	24.54	12.0±0.4	0.49		
N ₂	Лавсан	63.15	32.0±2.0	0.51		
Ar	Лавсан	83.81	38.0±2.0	0.45		

слоя, полученного по методу скоростной переконденсации

внутри оболочки в методе FST достигает 110 К/сек, т.е. превышает установленное выше значение скорости охлаждения, необходимой для аморфизации изотопов водорода (q ~100 К/сек). В процессе эксперимента из канала формирования вылетала мишень с прозрачным криогенным слоем, который оставался прозрачным при нагреве от 4.2 К до некой пороговой температуры $T_a = (0.4 \div 0.5)T_{TP}$. При температуре T_a происходила необратимая рекристаллизация прозрачного слоя (см. Рис.1.4). Таким образом, можно сделать вывод, что метод FST позволяет сформировать внутри незакрепленной движущейся оболочки твердый прозрачный слой из изотопов водорода в состоянии аморфно-нанокристаллическое.

Однако данное ультрадисперсное состояние вещества метастабильно и потому имеет тенденцию к рекристаллизации, что и было обнаружено экспериментально.

Существуют ли способы стабилизации аморфно-нанокристаллического состояния?

Известно, что введение в вещество определенных примесей позволяет, с одной стороны, повысить уровень дисперсности материала в процессе его кристаллизации, а с другой затормозить процесс роста кристаллических зерен при нагреве, т.е. повысить тепловую устойчивость ультрадисперсной структуры.

^{*/}При толщинах более 15 мкм внутри оболочки сразу образовывался непрозрачный поликристаллический криогенный слой.



Рис.1.4. Рекристаллизация прозрачного криогенного слоя при нагреве оболочки до пороговой температуры T_a

(a) Оболочки из стекла (\emptyset 540 и 450 мкм) заполнены n-H₂ (J=1, 75%) до 27 атм (300 K), толщина слоя 2 мкм, T_a=5 K. Разрежение в канале формирования (KФ) 0.02 Top; (б) Оболочки из полистирола (\emptyset 938 и 949 мкм) заполнены равнопроцентной смесью H₂+D₂ до 112 атм (300 K), толщина слоя 16 мкм, T_a=7.5 K. Разрежение в КФ 0.01 Top; (в) Оболочки из стекла (\emptyset 550-600 мкм) заполнены n-D₂ (J=1, 35%) до 80 атм (300 K), толщина слоя 6.3 мкм, T_a=9 K. Разрежение в КФ 0.02 Top.

При сопоставимых условиях формирования образца, кристаллические зерна в сплавах и металлах с примесями являются, как правило, более мелкими, чем в чистых металлах [28-30]. При этом, большинство примесей задерживают процессы рекристаллизации, но в различной степени. В литературе имеются указания, что на температуру рекристаллизации материала оказывают влияние температура плавления примесей, их атомный радиус и валентность [31-34].

Хотя в литературе отсутствуют прямые указания на возможность получения ультрадисперсного водорода, можно ожидать, что основные закономерности формирования и стабилизации такого класса структур, известные для металлов, полупроводников и других веществ, сохранятся и для изотопов водорода.

В случае реакторных мишеней, когда толщина криогенного слоя достигает 200 мкм и более, в методе FST проблематично получить скорости охлаждения мишеней порядка 100 К/сек, необходимые для формирования аморфных слоев из чистых изотопов водорода. Однако наличие определенных примесей может привести к увеличению энергию активации диффузии ΔU , и, тем самым, к увеличению параметра аморфизации вещества ε ($\varepsilon = \Delta U/kT_m$).

Из исследований по аморфизации металлов известно, что введение некоторых примесей позволяет снизить требуемую скорость охлаждения расплава на несколько порядков [35]. Например, если для стеклования чистых металлов необходимы сверхвысокие скорости охлаждения расплава – выше 10^{10} К/сек, - то в жидких сплавах, содержащих до 20% определенных добавок (сплавы металл-металлоид), стеклование возможно при реально достижимой скорости охлаждения $10^4 \div 10^6$ К/сек. Кроме того, рост энергии активации диффузии тормозит диффузионные процессы в веществе, что снижает риск рекристаллизации ультрадисперсного слоя при нагреве.

Таким образом, можно ожидать, что наличие определенных примесей к водородному топливу приведет

a) к снижению требований на скорость охлаждения расплава для получения ультрадисперсного криогенного слоя,

б) к увеличению тепловой устойчивости ультрадисперсного слоя и расширению температурной области его существования.

Для проверки высказанных предположений был проведен цикл экспериментальных исследований [7,36-39], на основании которых была разработана методика получения топливного слоя в термостойком ультрадисперсном состоянии. Данная методика запатентована в России [40]. В работе использовался специализированный экспериментальный FST-комплекс, созданный в ФИАН (см. Приложение к настоящей главе).

§4. Получение термостойкого ультрадисперсного криогенного слоя

4.1. Условия эксперимента

Отличительной особенностью экспериментов являлось формирование топливного слоя внутри замкнутого микрообъекта (сферической оболочки), что потребовало разработки новых

оригинальных устройств и методов для реализации различных факторов воздействия на формируемый криогенный слой.

Ультрадисперсный прозрачный слой формировался методом FST при относительно высокой скорости охлаждения (более 1 К/сек). В качестве примесей были использованы либо изотоп водорода с отличной от основного компонента тройной точкой, либо неон. В экспериментах изучена рекристаллизация твердого прозрачного криогенного слоя под воздействием термоциклической обработки (ТЦО). Один цикл ТЦО проводился в следующем порядке: изотермический отжиг (T = $4.4 \div 6$ K, t = $20 \div 45$ мин) \Rightarrow нагрев до T = $16 \div 40$ K \Rightarrow охлаждение до T = $5 \div 6$ K.

Эксперименты были проведены при следующих условиях:

- 1. Параметры сферических оболочек: Ø 0.4÷0.6 мм (стеклянные оболочки), Ø 0.9÷1.5 мм (полистироловые оболочки)
- 2. Давление заполнения смесью газов: 20 ÷ 500 атм при 300 К
- 3. Основной компонент смеси: H₂ или D₂ (от 50 до 99.9 % по объему)
- 4. Примесный компонент смеси: HD (0.03÷9%), D₂ (1÷50%), Ne (20%)
- 5. Способ формирования криогенного слоя: теплоотвод через пятно контакта между оболочкой и охлажденной стенкой (по методу FST)

Методы получения и измерения концентрации примесей и заполнения сферических оболочек газом изложены в [41]. Особенности формирования криогенного слоя методом FST изложены в Главе 2 настоящей публикации.

4.2. Ультрадисперсный слой на основе смесей Н₂/HD

В серии экспериментов изучена смесь на основе водорода с примесью HD, концентрация которой составляла от 0.03 до 9.9%. Диагностика состава смеси осуществлялась с помощью масс-спектрометра *MU3305*, который имеет следующие пределы обнаружения изотопов водорода: 0,01% для H₂ и D₂, 0.02% для HD [42]. Состав исходного газа, использованного в различных экспериментах, приведен в Таблице 1.2. Заметим, что в данных экспериментах тройная точка примеси превышала тройную точку основного компонента.

Температура оболочек перед входом в канал формирования составляла 300 К (стеклянные оболочки) или 30-45 К (полистироловые оболочки), давление заполнения газом внутри оболочек составляло от 40 до 100 атм (300 К). Время пребывания оболочки в канале формирования составляло ~0.5÷4 сек. Скорость охлаждения составляла ~10÷100 К/сек. Минимальная температура оболочки с вымороженным внутри нее прозрачным криогенным слоем составляла 5 К. При исследовании температурной устойчивости прозрачности слоя, образовавшегося внутри оболочки, ее нагревали от 5 К до 16÷40 К, а затем вновь охлаждали до 5 К со средней скоростью ~1 К/мин. Эволюция слоя наблюдалась визуально с помощью оптической системы, а также записывалась на видеомагнитофон.

Как правило, при первом цикле нагрева прозрачный криогенный слой не изменял своего качества. Обнаружено, что два или более циклов нагрева-охлаждения приводят к возникновению переходного состояния, когда в прозрачном слое появляются отдельные крупномасштабные неоднородности (Рис.1.5).

Результаты экспериментов представлены в Таблице 1.3. Как следует из таблицы, начальная температура исчезновения неоднородностей варьируется в диапазоне (14.3÷22.2)±1.5 К. Зависимость температуры исчезновения неоднородностей от числа циклов термообработки для оболочки №3 показана на графике (Рис.1.6).



Рис.1.5. Появление и эволюция неоднородности в криогенном слое при втором нагреве оболочки (см. Таблица 1.3, оболочка.№3). (а) прозрачный слой при Т=5К; (б) появление неоднородности в прозрачном слое при Т=8.4 К; (в-д) – процесс исчезновения неоднородности в диапазоне температур (16.0÷16.5)±1.5 К





Состав слоя: 99.47% H₂, (0.53±0.11)% HD, D₂ <1 %. Крупномасштабная неоднородность возникла в слое при T=8.4 К в процессе вторичного отогрева оболочки. Область А: прозрачный слой; 3 мТор в тестовой камере. Область Б: переходное состояние; 3 мТор в тестовой камере. Область В: кристаллический слой; 20 Тор т/о гелия в тестовой камере.

В ряде экспериментов было исследовано влияние орто-пара состава водорода на термостойкость прозрачного слоя с малой примесью HD. Проброс стеклянных оболочек, заполненных водородом с разным орто-пара составом (75%, 60% и 50% орто-H₂), был осуществлен при разрежении в канале формирования 0.01 тор. Давление заполнения оболочек газом составляло 50÷73 атм (при 300 K), состав газа: H₂ (99.47%) и примесь HD (0.53%).

Эксперимент проводился по следующей схеме: инжекция оболочки из канала формирования в тест камеру (T=5 K) \Rightarrow отжиг (T=5K, t=20 мин) \Rightarrow нагрев до 23.5 K \Rightarrow охлаждение до 5 К.

№ пробы	Название пробы	H ₂ ,%	HD,%	D ₂ ,%	Примеси (N ₂ , CO, O ₂ и пр.), менее, %
	исходный газ	99.70	< 0.015	< 0.015	0.3
1	камера 3	90.60	8.9±0,1	0.2 ± 0.1	0.3
	исходный газ	< 0.01	0.4	99.2	0.3
2	камера 1	< 0.1	5.85±0,15	93.75±0.15	0.3
2	камера 2	<0.1	4.95±0.35	94.65±0.4	0.3
	камера 3	< 0.1	9.9±0.1	89.7±0.1	0.3
3	исходный газ	< 0.01	0.4	99.3	0.3
	камера 1	<0.1	5.0	94.6	0.3
1	исходный газ	< 0.05	0.8	99.2	0.5
	камера 1	< 0.05	1.8	98.2	0.5
	камера 2	< 0.05	3.5	96.5	0.5
5	исходный газ	99.90	-	-	0.1
	камера 1	99.29	0.56±0.11	0.15±0.11	0.1
6	исходный газ	99.90	-	-	0.2
	камера 1	99.47	0.53±0.11	-	0.2
7	исходный газ	99.75	-	-	0.25
	камера 1	99.45	0.30±0.10		0.25
8	исходный газ	99.90	-	-	0.1
	камера 1	98.58	0.15±0.05	-	1.27
9	исходный газ	99.90	-	-	0.1
	камера 1	99.61	0.03±0.01	-	0.36
10	исходный газ	99.70	-	-	0.3
	камера 1	99.94	0.06±0.02		0.1
	камера 2	99.95	0.04±0.02	-	0.1
	камера 3	99.95	0.03±0.02	-	0.02
11	исходный газ	99.93	-	-	0.07
	камера 1	99.88	0.11±0.01	-	0.01
12	исходный газ	99.92	-	-	0.08
	камера 1	98.70	0.20±0.01	-	1.02

Таблица 1.2. Результаты анализа проб смесей газов, приготовленных для экспериментов

Таблица 1.3. Стабильность криогенного слоя при тепловой обработке.

Ν	P,	n	Стабильность криогенного слоя		ΔΤ, Κ
	тор				
1	0,001	3	Первый и второй нагрев до 20К – слой прозрачен	5.7	17.5÷18.9
2	0,001	3	Первый и второй нагрев до 20К – слой прозрачен	10.0	22.2÷24.2
3	0,003	2	Первый нагрев до 20К – слой прозрачен	8.4	16.0÷16.5
4	0,003	4	1-3 нагревы до 20К – слой прозрачен	8.2	15.2÷16.2
5	0,01	1	Отжиг в течение 22 мин при 5К:	5.0	14.3÷15.6
			в прозрачном слое образуется неоднородность		
6	10	1	Полная кристаллизация слоя после заполнения ка-	5.0	14.0÷14.1
			меры гелием до 15 тор		

*/ N – номер стеклянной оболочки, P- давление в тест камере, n – номер цикла, когда появляется неоднородность, T и Δ T – температура появления неоднородности и диапазон ее исчезновения, ошибка в измерении температуры: ±1.5К (N1-5), ±0.1К (N6)

Результаты экспериментов приведены в Таблице 1.4. Как следует из таблицы, в каждой из восьми оболочек сначала исследованных образовывался прозрачный криогенный слой. Только в одном случае (оболочка №3 из Таблицы 1.4) слой рекристаллизовался в процессе первого отжига. В остальных случаях слой оставался прозрачным в процессе отжига и первого цикла ТЦО (нагрев-охлаждение). Таким образом, можно заключить, что изменение концентрации орто- водорода в диапазоне 50÷75% не оказывает суще-

Таблица 1.4. Влияние орто состава	водорода
на стабильность прозрачного	слоя

	nu entre entre entre up esp u meee enem							
Ν	α	Α	Б	В				
1	60%	прозрачный	прозрачный	прозрачный				
2	50%	прозрачный	прозрачный	прозрачный				
3	75%	прозрачный	появление не-	кристалли-				
			однородности	ческий				
4	60%	прозрачный	прозрачный	прозрачный				
5	75%	прозрачный	прозрачный	прозрачный				
6	60%	прозрачный	прозрачный	прозрачный				
7	75%	прозрачный	прозрачный	прозрачный				
8	60%	прозрачный	прозрачный	прозрачный				

Обозначения: N – номер исследованной оболочки, αконцентрация орто-модификации водорода внутри оболочки; A - состояние слоя сразу после инжекции оболочки (T=5 K), Б- состояние слоя после отжига (T=5 K, t=20 мин), В – состояние слоя после первого цикла ТЦО, проведенного в диапазоне температур 5÷23.5 К

ственного влияния на поведение прозрачного слоя.

Состояние слоя при первом нагреве оболочки №7 (Таблица 1.4) со скоростью 5 К/мин показано на Рис.1.7. Видно увеличение толщины слоя на дне оболочки при нагреве выше тройной точки водорода, которое образуется как результат гравитационного стекания жидкости.

Стабилизирующее воздействие HD примеси на слой водорода было обнаружено также в экспериментах, в которых было исследовано четыре оболочки из стекла. Давление заполнения оболочек газом составляло $65\div75$ атм (при 300 K), состав газа: $90.9\%H_2$, 8.9%HD, остальные примеси (CO₂, CO, N₂ и пр.) - менее 0.2%. При пробросе через канал формирования (при разрежении в канале 0.08 тор) в оболочках образовался прозрачный слой, который не изменил своего качества в течение трех циклов ТЦО. Лишь при 4-м нагреве появились неоднородности в прозрачном слое.

В этих же экспериментах было проведено исследование эволюции неоднородного слоя при импульсном нагреве. Было обнаружено, что в результате соударения с горячей мишенью, инжектированной в камеру, кристаллический слой внутри оболочки, находящейся при T=5 K, просветляется и сохраняет свою прозрачность в последующих 2-х циклах ТЦО.



Рис.1.7. Прозрачный криогенный слой (H2 с примесью 0.53% HD) не кристаллизуется при первом нагреве от 5 К до тройной точки водорода (T=13.96 K) и выше.

Сравнительные эксперименты на смеси водорода с малым количеством HD $(0.015 \div 0.11\%)$, а также на водороде без примесей показали, что слой водорода с примесью HD менее 0.11% ведет себя так же, как и слой из чистого H₂, т.е. кристаллизуется при нагреве до пороговой температуры T_a (см. Таблицу 1.1)

В серии экспериментов, проведенных с оболочками из полистирола, был сформирован



Рис.1.8. Вымораживание толстого слоя твердого водорода с небольшой примесью HD. (а) Оболочка из полистирола Ø1400 мкм, внешнее покрытие из сплава Pt/Pd толщиной 150Å; состав слоя: 95%H₂, 5%HD; средняя толщина слоя 50 мкм; (б) Оболочка из полистирола Ø1250 мкм (без покрытия); состав слоя: 95%H₂, 5%HD; средняя толщина слоя 41 мкм

прозрачный слой из смеси 95%H₂/5%HD. Оболочки имели диаметр 1.2÷1.5 мм и были покрыты снаружи тонким слоем из Pd либо из сплава Pt/Pd. Давление заполнения составляло 275 атм при 300 K, средняя толщина слоя составляла 44÷51 мкм. Начальная температура входа оболочек в канал формирования составляла 45 K, конечная температура – 5 K, время пребывания в канале ~2 сек, скорость охлаждения оболочки в процессе формирования слоя dT/dt > 20 K/сек.

Эти эксперименты впервые продемонстрировали возможность формирования толстого прозрачного слоя методом FST с применением малых примесей в составе водорода. Результаты вымораживания показаны на Рис.1.8.

Следует отметить, что длительный отжиг часто приводит к появлению крупномасштабных неоднородностей в прозрачном слое. Например, отжиг в течение 45 минут, проведенный при 5 К для оболочки из полистирола с первоначально прозрачным слоем толщиной 44 мкм (H_2 с 5%HD примесью), привел к появлению неоднородности, которая исчезла лишь при нагреве до 21-22.5 К. Фотография мишени после отжига показана на Рис.1.9.



Рис.1.9. Отжиг при 5К в течение 45 мин приводит к образованию неоднородностей в прозрачном слое. Оболочка из полистирола Ø 1200 мкм. Толщина криогенного слоя 44 мкм. Состав слоя: 95.0% H₂, 5%HD

Эксперименты показали, что необходимым условием формирования стабильного прозрачного криогенного слоя внутри оболочки является достаточно высокое разрежение в модуле формирования и тестовой камере (не хуже 0.01 тор). Заполнение камеры теплообменным гелием приводит к кристаллизации прозрачного слоя (Рис.1.10). Полученные кристаллы плавятся в узком диапазоне температур 14÷14,1 К, т.е., вблизи тройной точки чистого H₂ (циклы 6-8 на Рис.1.6 и оболочка N6 в Таблице 1.3).

Таким образом, в условиях вакуума была продемонстрирована возможность формирования криогенного слоя, прозрачного в широкой области существования твердой фазы водорода от 5 К до тройной точки. Установлено, что концентрация HD примеси в H₂ должна превышать 0.11 %, при этом количество примеси, обеспечивающее максимальную стойкость прозрачного слоя при ТЦО, соответствует 8.9%



Рис.1.10. Кристаллизация прозрачного слоя при охлаждении оболочек в присутствие 15 тор т/о гелия. (а) T=18 К, жидкий слой; (б) T=4.5 К. Оболочка из стекла, давление заполнения 75 атм, состав газа: 99.7% H₂, 0.53% HD

(a) 18 К, жидкий слой \Rightarrow охлаждение \Rightarrow (б) 4.5 К, твердый слой

4.3. Ультрадисперсный слой на основе смеси D₂ с различными примесями

Смесь D₂+H₂

В серии экспериментов была исследована температурная эволюция криогенного слоя,

приготовленного из смеси водорода и дейтерия при вариации каждого компонента от 0 до 100%. Проброс стеклянных оболочек, заполненных исследуемой смесью до давления 44 ÷ 70 атм (при 300 К), осуществлялся в вакуумном канале формирования с винтовой 17-витковой вставкой. Разрежение в канале и тестовой камере при этом составляло 0.01 тор. Всего в этих экспериментах исследовано 18 оболочек из стекла.

Эксперименты убедительно свидетельствуют о следующем:

 Об отсутствии рекристаллизации слоя из смеси H₂ с добавкой дейтерия 5÷20% (от объема) при ТЦО в диапазоне температур 5-23.5 К (поведение, аналогичное слою из смеси H₂ с малой добавкой HD). Слой



Рис.1.11. Тепловая устойчивость слоя в зависимости от концентрации D₂ в смеси D₂+H₂

также сохранял свою прозрачность при отжиге: температура отжига 5 К, длительность - 20 мин.

- 2. О рекристаллизации слоя из эквимолярной смеси D₂+H₂ при нагреве выше 9.4÷11 К.
- 3. О рекристаллизации слоя из смеси 95%D₂+5%H₂ при нагреве выше 9 К.

Температура рекристаллизации смеси с малой примесью водорода примерно совпадает со значением T_a, обнаруженным для чистого дейтерия в опытах по скоростной переконденсации (см. Таблицу 1.1). Тоже самое относится к эквимолярной смеси D₂+H₂.

Таким образом, результаты экспериментов, в основном, подтверждают общие закономерности поведения прозрачных аморфно-нанокристаллических слоев, обнаруженные ранее (см. Рис.1.4).

В тоже время, в диапазоне концентраций дейтерия ~1-20 % прозрачный слой не претерпевал рекристаллизации по крайней мере в первом цикле ТЦО.

Зависимость температуры рекристаллизации от концентрации D_2 в смеси D_2 + H_2 показан на Рис.1.11.

Смесь D₂+HD

В эксперименте были исследованы 6 стеклянных оболочек \emptyset 400-500 мкм, заполненных дейтерием с примесью HD до давлений 60 ÷ 70 атм (300 К). Концентрация примеси в различных оболочках варьировалась в пределах от 4.95% до 10%. Элементный состав газовой смеси, которой были заполнены оболочки, показан в Таблице 1.5.

Во всех оболочках, независимо от концентрации добавки, методом FST был первоначально сформирован прозрачный слой. В течение 20-ти минутного отжига,



Рис.1.12. Смесь D_2 +HD(4,95-10%). Появление неоднородностей в прозрачном слое в процессе отжига при T=5.5 К.

который происходил при T = 5.5 K, во всех оболочках образовались крупномасштабные неоднородности (Рис. 1.12).

No kononu		HD ,%	П 0/	Другие примеси		
л⊍ камеры	$D_2, 70$		$\Pi_2, 70$	Тип газа	%	
камера 1	94,15	5,85	нет	N ₂ , CO, CO ₂ , C-H	0,23	
камера 2	95,50	4,95	< 0,01	O ₂ , CO ₂ , C-H	0,09	
камера 3	90,00	10,00	< 0,02	N ₂ , CO, O ₂ , CO ₂ , C-H	0,13	
камера 4	91,10	9,90	нет	N ₂ , CO, O ₂ , CO ₂ , C-H	0,18	
Исходный газ	99,55	0,04	< 0,01	нет	нет	

Таблица 1.5. Состав газовой смеси в эксперименте со смесью D2+HD

Смесь D₂+Ne

В данном эксперименте исследованы стеклянные оболочки, заполненные дейтерием с примесью неона в количестве 20%. Давление заполнения оболочек газом составляло ~125 атм (стеклянные) и 300 атм (полистироловые). Проброс мишеней осуществлялся в винтовом канале формирования.

Экспериментально исследовано три режима охлаждения смеси внутри оболочки: быстрый, средний и медленный. Обнаружено следующее.

а) Опыты в режиме быстрого охлаждения: формирование слоя при пробросе оболочек в канале, заполненном теплообменным гелием до давления 3 тора

Теплоотвод осуществляется через пятно контакта между оболочкой и стенкой канала формирования, а также через окружающий теплообменный гелий. Согласно нашим оценкам [43], скорость охлаждения в этом случае составляет от 100 К/сек и выше. В условиях эксперимента ошибка в определении температуры составляла не более 0.1 К.

В данном режиме внутри оболочек образовывался непрозрачный криогенный слой со структурой типа «мелкозернистая» и характерным размером зерна 10-20 мкм (Рис.1.13,а). Особенности эволюции слоя при нагреве иллюстрирует Рис. 1.13 (а-ж).

При температуре тройной точки дейтерия (18.65 К), заметная часть вещества слоя плавится. По завершении процесса плавления, на стенке оболочки остается некая «сетка локальных уплотнений» или СЛУ (Рис. 1.13, д-е), которая плавится в диапазоне температур от $T_1=23.5$ К (начало плавления) до $T_2=23.8$ К (конец плавления). Такое поведение слоя показывает, что СЛУ представляет собой твердый раствор неона с небольшой примесью дейтерия. Оценим количество дейтерия в данном твердом растворе.

Из закона Рауля для идеальных растворов следует [44]:

$$T = \sum_{i=1}^{n} X_i T_i \tag{1.2}$$

где T – температура начала плавления твердого раствора, состоящего из n компонент; X_i – концентрация i-й компоненты; T_i – тройная точка i-й компоненты.

Предполагая, что СЛУ образует идеальный раствор D₂+Ne, из соотношения (1.2) можно оценить количество дейтерия в этом растворе:

$$T_1 = X_1 T_{rp1} + X_2 T_{rp2}$$
(1.3)

где T_1 – температура начала плавления раствора, X_1 и X_2 =1- X_1 количество дейтерия и неона в растворе, соответственно, T_{rp1} =18.65 К – тройная точка дейтерия, T_{rp2} =24.54 К - тройная точка неона.

Из (1.3) следует, что содержание неона в СЛУ составляет 82% (соответственно количество дейтерия равно 0.18%):

$$X_2 = (T - T_1)/(T_2 - T_1) \approx 0.28$$
(1.4)

Таким образом, лишь около 4% от общего количества дейтерия образует твердый раствор с неоном в исходной смеси (80%D₂ и 20% Ne). Сделаем несколько замечаний к обсуждаемому эксперименту.

<u>а1.Образование твердого раствора.</u> Как показали наши исследования по скоростному вымораживанию прозрачного слоя методом FIF (см. §3), при отводе тепла от поверхности оболочки через теплообменный гелий (жидкий или газообразный), процесс образования слоя из чистых изотопов водорода всегда сопровождается капельной конденсацией в объеме.

При использовании примесей, процесс капельной конденсации в объеме инициируется легче, поскольку молекулы примеси, отличающиеся по своей массе от молекул основного вещества, увеличивают флуктуации плотности, играющие роль затравок при образовании капель. При последующем быстром отверждении из этих капель может образоваться твердый раствор.

В процессе своего движения внутри канала формирования, оболочка вращается. Капли падают на внутреннюю поверхность вращающейся оболочки, что способствует однородному распределению вещества по поверхности.

<u>а2.Увеличение концентрации одного из компонент.</u> В работе [45] экспериментально показано, что неон и дейтерий способны образовывать твердые растворы только при очень малом количестве одного из компонент смеси (менее 0.5%). Этот факт находится в кажущем-





*Рис. 1.13. Особенности температурной эволюции криогеного слоя из смеси 80%D*₂+20%*Ne*. В камере теплообменный гелий под давлением 3 тор; (а)-(ж) - процесс нагрева, (ж)-(и) – процесс охлаждения; (а) мелкозернистый слой, полученный при охлаждении оболочки методом FST в присутствие теплообменого гелия в канале формирования; (а)-(г) эволюция мелкозенистого слоя при нагреве; (д) плавление дейтерия при T=18.65 K; (е) состояние компонентов смеси внутри оболочки при T=21 K: Ne – твердый, D₂ - жидкий; (ж) завершение процесса плавления неона при T=23.8 K; (з) отверждение неона при медленном охлаждении оболочки (0.05 K/сек); состояние компонентов смеси внутри оболочки при T=20 K: Ne – твердый, D₂-жидкий; (и) отверждение дейтерия при дальнейшем медленном охлаждении оболочки (0.05 K/сек); состояние компонентов смеси внутри оболочки при T=20 K: Ne – твердый, D₂-жидкий; (и) отверждение дейтерия при дальнейшем медленном охлаждении оболочки (0.05 K/сек); состояние компонентов смеси внутри оболочки при T=15.9 K: Ne – твердый, D₂-твердый.

ся несоответствии с нашей работой. Однако мы хотим подчеркнуть, что в работе [45] охлаждение смеси осуществляется в режиме, близком к равновесному, т.е. достаточно медленно. Наоборот, в наших экспериментах смесь D_2 +Ne охлаждается быстро (по крайней мере, на 2 порядка быстрее, чем в [45]), т.е. процесс образования твердого раствора проходит в существенно неравновесных условиях.

Из литературы известно, что в процессе получения твердых растворов в неравновесных условиях (например, при высоком переохлаждении), область однофазных растворов из исходных компонентов может быть гораздо шире, чем номинальная. Данный факт подтверждается в работе [46], в которой экспериментально исследованы растворы смеси D₂+Ne, формируемые на поверхности глубоко охлажденной подложки (т.е. при строго неравновесных условиях).

Результаты наших исследований, проведенных при неравновесном процессе вымораживания смеси D_2 +Ne на поверхности оболочки (при этом достигалась скорость охлаждения ~ 100 К/сек) показали, что в этих условиях количество индивидуальных компонент в твердом растворе D_2 +Ne может быть значительным.

б) Опыты в режиме медленного охлаждения в присутствии теплообменного гелия

При относительно медленном охлаждении (~0.05 К/сек) мишеней с жидкой смесью D_2 +Ne в присутствии в камере теплообменного гелия (при давлении 3 тор), наблюдается следующее. Сначала, в районе тройной точки неона (T_{Tp} =24.54 K), возникает темное образование, локализованное у дна оболочки. Это явление можно связать с образованием твердого неона. При последующем охлаждении до 20 К положение уплотнения не изменяется (см. Рис.1.13,3). Затем, при T~18.65 К (тройная точка дейтерия), возникают кристаллы, которые покрывают всю внутреннюю поверхность оболочки (Рис. 1.13,и). В данных условиях эксперимента ошибка в определении температуры в месте расположения датчика (см. Рис.15, Приложение) составляла не более 0.1 К.

Эти наблюдения позволяют судить о характере взаимодействия отдельных компонентов смеси со стенкой стеклянной оболочки: жидкий неон не смачивает поверхность стекла, в то время как дейтерий хорошо ее смачивает. Эти наблюдения находятся в согласии с работой [47].

в) Опыты со средним темпом охлаждения: формирование слоя при пробросе оболочек в вакуумном винтовом канале формирования (разрежение 0.035 тор)

При пробросе в вакуумном винтовом канале формирования во всех оболочках образовывался прозрачный слой (Puc.1.14,a). В данном режиме теплоотвод от оболочки осуществлялся только через пятно контакта с охлажденной стенкой канала. Скорость охлаждения в экспериментах составляла от 1 до 50 К/сек. Ошибка в определении температуры составляла не более 3 К.

Интересно отметить, что прозрачность слоя не нарушалась при подаче в камеру теплообменого гелия вплоть до давления 3 тор. Во всех предыдущих экспериментах со смесями изотопов водорода в этом случае происходила быстрая кристаллизация прозрачного слоя.

Изотермический отжиг прозрачного слоя при температуре 4.4 К в течение более 40 мин приводил к появлению в слое крупномасштабных неоднородностей (Рис. 1.14,б).

При нагреве оболочки неоднородности постепенно исчезали в диапазоне температур от $T_1=20.0$ К до $T_2=21.5$ К. Оценки по формуле (1.3) показывают, что, в пределах ошибки измерения (±3К), это совпадает с условиями плавления твердого раствора в котором дейтерий составляет ~77%, а неон ~23%. Отсюда можно заключить, что при данном режиме охлаждения примесь равномерно распределяется по основному компоненту.



Рис. 1.14. Формирование и эволюция прозрачного слоя из смеси $80\%D_2+20\%Ne$ (а) Образование прозрачного криогенного слоя. Оболочки №1,2,3 сразу после проброса в винтовом канале формирования при давлении остаточного газа в канале 35 мТор. Т=4.4 К; (б) появление неоднородностей в процессе изотермического отжига (T=4.4 K, t=40 мин)

Таким образом, эксперименты, проведенные на смеси 80%D₂/20%Ne, показали:

1. Медленное охлаждение со скоростью $dT/dt \sim 0.05$ К/сек; теплосъем от поверхности оболочки идет как через пятно контакта, так и через теплообменный гелий (3 тор). В этом случае, компоненты смеси вымораживаются на внутренней стенке стеклянной оболочки независимо друг от друга - сначала примесь с более высокой тройной точкой (Ne), а затем D₂. При этом видно, что неон не смачивает поверхность стекла, тогда как дейтерий хорошо ее смачивает. Таким образом, в данном режиме невозможно достичь равномерного распределения примеси по объему конденсированного слоя и выморозить ультрадисперсный твердый раствор.

2. Быстрое охлаждение со скоростью dT/dt > 100 К/сек; теплосъем от поверхности оболочки идет как через пятно контакта, так и через теплообменный гелий (3 тор). В этом случае, криогенный слой имеет характерную мелкозернистую структуру и состоит из двух различных веществ: чистого твердого дейтерия и твердого раствора дейтерий/неон. Лишь малое количество дейтерия (не более 4% от общего количества D_2 в смеси) участвует в образовании твердого раствора. Причем, распределение этого раствора в криогенном слое имеет специфический вид «сетки локальных уплотнений», равномерно покрывающей внутреннюю поверхность оболочки.

3. Средняя скорость охлаждения с $dT/dt \sim 1 \div 50$ К/сек; в канале формирования разрежение 0.035 тор, теплосъем от поверхности оболочки идет только через пятно контакта. В этом случае, на стенке оболочки вымораживается однородный прозрачный слой из твердого раствора D₂+Ne. Именно этот режим позволяет получить твердый прозрачный слой, устойчивый к нагреву.

4.4. Выводы

Итак, экспериментально доказано, что введение определенных примесей в водород или дейтерий на стадии заполнения оболочки газом, позволяет расширить область температурного существования ультрадисперсного состояния криогенного слоя вплоть до тройной точки основного компонента (T_{тр}).

Количество и тип примеси существенно определяет возможность получения термостойкого ультрадисперсного слоя. Влияние количества примесей на тепловую устойчивость слоя иллюстрирует сводная таблица экспериментальных данных (Таблица 1.6). Из таблицы следует, что количество примесей не должно быть слишком велико или слишком мало. В частности, для H₂ с примесью HD оптимальное количество примеси находится в диапазоне 0.53-8.9%.

Таблица 1.6. Влияние количества примеси к *H*₂ на термостойкость прозрачного слоя

N	n	ΔT,K	примесь, %	T _{CR} , K
1	0	4.2-14	0	5÷7
2	0	6.2-20	0.11	6.3
3	1	5.6-20	0.53	8.4
4	2	5.6-20	0.53	10.0
5	3	5.6-20	0.53	8.2
6	3	6.2-20	8.90	6.3
7	4	6.2-20	8.90	6.2
8	0	4.2-18	50.00	7÷9

1) п – число ТЦО до появления неоднородностей в прозрачном слое, Δ T- температурный диапазон ТЦО, T_{CR} – температура появления неоднородностей. 2) Примеси к основному компоненту (H₂): HD в случаях N 2-7, D₂ в случае N 8.

Эксперименты показали, что температура плавления примеси должна быть выше температуры плавления основного компонента. Только в этом случае возникает прозрачный слой, устойчивый к нагреву. Эти результаты находятся в соответствии с результатами исследований термостабильности металлических аморфных пленок, получаемых методом закалки паровой фазы в присутствии примесей. В работах [32,33] отмечается, что температура рекристаллизации аморфно-нанокристаллической пленки тем выше, чем выше температура плавления примеси Т_{пл}, при этом всегда Т_{пл} выше температуры плавления основного компонента.

Отметим также, что наши результаты с использованием неона в качестве примеси, находятся в соответствии с результатами экспериментов Бэррета и др. [34], которые показали, что примесь неона к водороду или дейтерию тормозят рост кристаллических зерен при нагреве до 16 К (более высокие температуры в [34] не исследовались).

Поскольку тритий может исполнять роль высокоплавкой примеси по отношению к дейтерию, развитый способ перспективен для получения термостойкого ультрадисперсного слоя в мишенях с альтернативным топливом типа DT_x , где х $\leq 20\%$ - количество радиоактивного трития в топливной смеси.

Подтверждение этой возможности дают опыты по вымораживанию смеси D_2 +Ne. Эти опыты позволили также определить еще два необходимых фактора, позволяющих получить термостойкий ультрадисперсный прозрачный слой внутри замкнутых полых сферических оболочек:

- 1. При формировании слоя теплоотвод осуществляется только через ограниченную область контакта между оболочкой и подложкой, т.е. именно так, как в методе FST.
- Процессу формирования слоя должен сопутствовать эффект капельной конденсации в объеме оболочки.

Эксперименты показали, что применение соответствующих примесей позволяет увеличить допустимую толщину прозрачного ультрадисперсного слоя от 15 мкм до 51 мкм (б0льшие толщины не исследовались), что продемонстрировано для слоев из смеси H_2 +HD, намороженных на внутренней поверхности полистироловых оболочек диаметром 1.2÷1.5 мм.

Наконец, присутствие примеси снижает требуемую скорость охлаждения вещества внутри оболочки от 100 К/сек (чистые изотопы) до 1 ÷ 50 К/сек (изотоп + примесь).

По аналогии с термином «металлические стекла», будем в дальнейшем называть состояние твердых изотопов водорода, обладающих перечисленными выше свойствами, термином «водородные стекла».

§5. Природа «водородного стекла»

5.1. Методология

Особенности изучаемого объекта - сферический криогенный слой толщиной 5-50 мкм, находящийся внутри оболочки диаметром 0.5-1.5 мм, помещенной в оптическую камеру криостата при T= 4.2-20 К - не позволяют осуществить прямое измерение его микроструктуры ни одним из известных на сегодняшний день способов, таких как электронная микроскопия, рентгеноструктурный анализ, нейтронная, инфракрасная и ультразвуковая диагностика и пр. В частности, из-за того, что материал, расположенный вне оболочки на пути распространения рентгеновского излучения, является оптически более плотным, увидеть оболочку в центре ка-

меры практически невозможно. На Рис.1.15 показано рентгеновское изображение оптической камеры криостата, внутри которой находится оболочка (не видна на изображении).

Оптические наблюдения в проходящем свете (длина волны 0.4÷0.7 мкм) дают возможность увидеть теневое изображение оболочки с криогенным слоем. Однако это изображение позволяет только заключить, что размер зерна в сформированном прозрачном слое, во всяком случае, не превышает длины волны излучения.

Диагностику прозрачного слоя облегчает тот факт, что мелкозернистые структуры (с зерном менее 1 мкм), аморфные и нанокристаллические пленки, а также стекла ведут себя по разному при нагреве. В частности:

- При нагреве мелкозернистой пленки наблюдается постепенный и беспороговый переход в крупнозернистую структуру, связанный с процессом собирательной рекристаллизации (см.Рис.1.16).



Рис.1.15. Томографическое рентгеновское изображение сечения оптической камеры криостата (получено на томографе BT-1, производство ВЭИ)

1 – внешние стенки криостата, Т=300К, 2окна, 3 - камера с оболочкой (оболочка не видна в рентгеновских лучах), Т=4.2-20К, 4 - вакуумные промежутки



Рис.1.16. Процесс собирательной рекристаллизации, происходящий при нагреве мелкозернистого водородного слоя, вымороженного на внутренней стенке оболочки из стекла (средняя толщина слоя 3.8 мкм, температура тройной точки водорода 13.9 К).

Процесс происходит тем интенсивнее, чем ближе температура слоя к тройной точке.

При первом нагреве аморфно-нанокристаллической пленки до некоторой пороговой температуры T_a<T_{тр} наблюдается процесс быстрой рекристаллизации (см. Рис.1.4). Фазовое превращение аморфно-нанокристаллической пленки в кристалл, начавшееся при T_a, является мощным источником энергии для поддержания лавинообразного процесса кристаллизации.
 Характерный признак стекла - способность переходить в расплавленное состояние без кри-

сталлизации, а затем вновь возвращаться в состояние стекла при охлаждении. Кроме того, температурное поведение стекол существенно зависит от тепловой предыстории образца.

Таким образом, исследование температурной эволюции образца при различных режимах отжига, охлаждения и нагрева может служить инструментом для определения структурного типа вещества. Этот инструмент и являлся диагностическим средством, который был доступен в наших исследованиях.

5.2. Деградация «водородного стекла»: кристаллизация или структурная релаксация?

Полученный прозрачный термостойкий слой обладает следующими свойствами:

- 1. не плавится при повышении температуры от 5 K до $T \ge T_{Tp}$
- 2. не кристаллизуется при снижении температуры от $T \ge T_{Tp}$ до 5К
- 3. выдерживает более одного ТЦО в указанном диапазоне температур.

Проявлением деградации слоя является переходное состояние, которое сопровождается возникновением устойчивых зон оптической неоднородности в прозрачной фазе. Эти зоны занимают ограниченную часть объема слоя и сосуществуют с прозрачной фазой. Исчезновение неоднородностей происходит постепенно, при нагреве слоя до температуры на несколько градусов выше температуры тройной точки основного компонента, причем исчезновение неоднородностей происходит в диапазоне ~1-2 градуса.

Можно предположить, что данный процесс связан с образованием стабильной кристаллической фазы внутри аморфной матрицы. Следует, однако, констатировать, что картина образующихся неоднородностей и их характерная эволюция при нагреве существенно отличается как от картины пороговой кристаллизации «аморфных пленок», так и от процесса плавления кристаллической фазы. Это различие проявляется, прежде всего, в следующем:

1. В слоях типа «аморфная пленка» неоднородности возникают как результат лавинной кристаллизации при первом нагреве слоя до температуры, примерно вдвое меньшей значения тройной точки и переходят в жидкую фазу в тройной точке. Таким образом, можно однозначно отнести «неоднородности» «аморфных пленок» к кристаллическому состоянию.

2. В термостойких прозрачных слоях неоднородности возникают только через несколько ТЦО в диапазоне от 5 К до $T \sim T_{Tp}$, а их исчезновение происходит при температуре несколько



Рис.1.17. Состояние твердого H₂ -слоя после кристаллизации расплава в тройной точке (а), рекристаллизации прозрачной аморфной пленки (б), деградации прозрачного термостойкого слоя после нескольких циклов ТЦО (в).



выше Т_{тр}. Поэтому, данные неоднородности нельзя однозначно отнести к кристаллическому состоянию.

На Рис.1.17 приведены теневые фотографии оболочки со слоем твердого водорода, полученные в различных условиях: (а) при кристаллизации расплава, (б) при рекристаллизации прозрачной аморфной пленки, (в) в результате циклической тепловой обработки прозрачного термостойкого слоя (H₂ с примесью HD).

Предположим, что в результате вымораживания в присутствии примесей на стенке оболочки формируется слой типа «стекло». Каким образом должна была бы проявляться его деградация? Для описания этого процесса воспользуемся данными работ [32-35,48-57].

Поскольку в состоянии термодинамического равновесия система обладает минимумом энергии, зависимость свободной энергии F от структурного параметра (объема V) при различных температурах системы имеет вид потенциальной ямы как для твердого кристаллического, так и для жидкого состояния. Например, упругую часть свободной энергии можно представить как квадратичную функцию объема:

$$U(V) - U(V_0) = \frac{1}{2} K (V - V_0)^2 / V_0 \qquad (1.5)$$

где V_0 – равновесное значение объема, *K*- модуль всестороннего сжатия.

Два возможных энергетических положения равновесия молекулы в твердом теле (см. Puc.1.18(3)) - стабильное кристаллическое состояние и метастабильное аморфное – разделены

потенциальным барьером, высота которого зависит как от способа получения аморфной фазы, так и наличия в веществе определенных примесей.

При температурах выше температуры плавления Т>Тпл, уровень дна потенциальной

ямы F для жидкого состояния ниже, чем для твердого (Рис. 1.18 (1)), а при $T < T_{n\pi}$ – наоборот. Быстрой закалкой расплава можно добиться того, что при $T < T_{n\pi}$ система останется в метастабильном состоянии, характерном для переохлажденной жидкости. При температурах ниже точки стеклования (T_g) структура замораживается и состояние системы характеризуется точкой «в» на Рис. 1.18 (3), которая соответствует нестабильному, наиболее рыхлому аморфному состоянию. Такое состояние является неравновесным не только относительно стабильного кристал-лического, но и относительно метастабильного, характерного для переохлажденной жидкости (стекла).

Процесс перехода стекла из неравновесного состояния («в» на Рис. 1.18 (3)), полученного при быстром охлаждении расплава, в состояние метастабильного равновесия («б» на Рис. 1.18 (3)) принято называть *структурной релаксацией*, в отличие от процесса *кристаллизации*, связанного с переходом системы в состояние с абсолютным минимумом энергии.

Какова же роль примеси в этих процессах? Как известно, для преодоления энергетического барьера между метастабильным и стабильным состояниями требуется активация процесса диффузии. Из теории переходного состояния [555] вытекает известное уравнение Аррениуса, которое, для случая диффузии, имеет вид

$$D = D_0 exp (-\Delta U/kT), \qquad (1.6)$$

где D – коэффициент диффузии; D₀ - предэкспоненциальный множитель; ΔU – энергия активации процесса диффузии.



Рис. 1.18. Изменение свободной энергии F конденсированного состояния от температуры и объема (V).

(а) кристаллическое состояние; (б) метастабильное стекло; (в) нестабильное стекло

Энергия активации процесса и температура системы существенным образом характеризуют устойчивость системы. Чем больше значение энергии активации и ниже температура, тем медленнее идет диффузия при прочих равных условиях и, следовательно, тем легче сохраняется метастабильное состояние. Кроме того, энергия активации диффузии примеси тем выше, чем выше температура ее плавления [56].

Атомы примеси представляют собой центры упругих искажений, которые тем больше, чем сильнее эти атомы отличаются по размерам и свойствам от атомов основного вещества. В результате взаимодействия примесей с дефектами структуры, в частности, с вакансиями и границами зерен (в том числе границами кластеров аморфной структуры), упругая энергия данного структурного состояния уменьшается: потенциальная яма становится глубже, а энергетический барьер ΔF, соответственно, выше (см.Рис. 1.18,3).

Свойства стеклообразного состояния и его однородность являются структурночувствительными и существенно зависят от тепловой предыстории образца. Если провести быстрый нагрев нестабильного стекла, то процесс релаксации не успеет произойти и образец останется структурно однородным. Напротив, изотермический отжиг или медленный нагрев приводит к изменению структурных, механических и других свойств материала, в том числе к увеличению плотности, возрастанию модуля упругости, уменьшению коэффициента диффузии. Эти изменения связаны с протеканием процесса структурной релаксации. В начале этого процесса внутри нестабильной фазы появляются области с повышенной плотностью (метастабильное стекло), которые занимают достаточно ограниченную область. С течением времени происходит процесс расстекловывания, т.е. трансформация метастабильного состояния стекла в равновесное кристаллическое состояние, в котором вещество имеет максимальную плотность.

На Рис.1.19 (а,б), взятом из работы [51], показано изменение удельного объема стекла при нагреве со скоростью, меньшей (а) и большей (б) чем скорость охлаждения при формировании стеклообразного состояния. Здесь же для сравнения показана температурная эволюция удельного объема равновесного кристаллического состояния вещества (зеленая линия). Вид-



Рис. 1.19. Изменение удельного объема стекла при различном темпе нагрева. (а) линия 1 – быстрое охлаждение, линия 2 – медленный нагрев; (б) линия 1 – быстрое охлаждение, линия 2 – быстрый нагрев; Линия 3 – реализация равновесного кристаллического состояния, T_g – температура стеклования, T_{тр}- температура плавления, T_w – температура размягчения

но, что при быстром охлаждении получается малоплотное стекло (синяя линия), структура которого слабо изменяется при быстром нагреве (красная линия на Рис. 1.19,б), в то время как при медленном нагреве (красная линия на Рис. 1.19,а) стекло переходит в метастабильную, более плотную модификацию. Разница в плотности нестабильного и метастабильного стекол исчезает постепенно при нагреве образца до температуры стеклования.

5.3. Анализ экспериментальных результатов

Сравним теперь результаты наших исследований с поведением стекол, изложенном выше. Как отмечалось, процесс структурной релаксации сопровождается появлением более плотных областей внутри менее плотных, что можно обнаружить при оптическом наблюдении в проходящем свете. Похожий эффект мы наблюдали в экспериментах.

На Рис.1.7 показан прозрачный слой (H₂ с примесью HD). Как видно из рисунка, нагрев слоя от 5 К до 20 К со скоростью 5 К/мин не выявил следов образования неоднородности, за исключением образования разнотолщинности при T > 13.5 К, которую можно объяснить гравитационным стеканием криогенного слоя за счет снижения его вязкости.

На Рис.1.9 видно появление неоднородности в прозрачном слое водорода (с примесью HD), которое произошло в процессе изотермического отжига при T = 5K в течение 45 мин. Сравнительные фотографии поведения прозрачного слоя при соответствующей тепловой обработке показаны также вверху на Рис.1.19 (а,б).

На Рис.1.14 прослеживается процесс появления неоднородности в прозрачном слое, приготовленном из смеси $80\%D_2+16\%Ne$. Неоднородность возникла в процессе отжига при T=4.4 К в течение 40 мин. Неоднородность занимает ограниченный объем, который не увеличивается при последующем нагреве слоя со скоростью 5 К/мин. Это может означать, что область с метастабильным стеклом не растет по причине слишком быстрого нагрева (ср. красная кривая на Рис.1.19,б).

На Рис.1.20 виден прозрачный слой из смеси $D_2+20\%$ Ne, в котором, в процессе изотермического отжига при T = 9 K, образовалось два характерных уплотнения. При дальнейшем нагреве размеры уплотнений не изменились. При последующем отжиге при T=19.8 K (тройная точка дейтерия Tтp=18.65 K) данные неоднородности постепенно исчезли (Рис.1.21). В этом процессе не наблюдалось «стекания» вещества на дно оболочки. Это означает, что прозрачная матрица – твердая, несмотря на то, что температура отжига выше тройной точки основного компонента (дейтерия). Напротив, в процессе плавлении кристаллического слоя, когда вещество находится в состоянии твердое-в-жидком, всегда наблюдается движение отдельных кристаллических областей под действием сил гравитации.



Рис.1.20. Образование структурных неоднородностей в прозрачном слое D₂+20%Ne: отжиг при T=9K

Для того, чтобы осуществить переход из стеклообразного в кристаллическое состояние (т.е. из (а) в (б) на Рис.1.18,3) необходимо передать энергию, превышающую величину энергетического барьера ΔF . Как уже отмечалось, высота барьера зависит от наличия в веществе определенных примесей.

Из экспериментов с изотопами водорода без добавок (см. Таблицу 1.1 и Рис.1.4), следует, что нагрев прозрачного слоя водорода до 6÷7 К, а дейтерия до 8÷9 К, т.е. примерно до половины тройной точки изотопа, приводит к возникновению коллективного эффекта - его лавинной кристаллизации.

Эти результаты находятся в соответствии с наблюдениями по рекристаллизации аморфных-нанокристаллических пленок полупроводников, металлов и сплавов, полученных методом быстрого вымораживания пара на глубоко охлажденной подложке [35,52,53,57]. При нагреве таких пленок рекристаллизация происходит в диапазоне температур ($1/3 \div 2/3$)T_{пл}. Исследования [32,33] показали, что при внесении в пары металла определенных примесей термостойкость аморфных пленок возрастает, причем температура рекристаллизации тем выше, чем больше температура плавления примеси. В соответствии с работой [34] известно также, что примесь неона к H₂ и D₂ существенно тормозит рост кристаллических зерен при нагреве.



*Рис.1.21. Процесс разрушения неодородностей слоя из смеси D*₂+*Ne (20%) вблизи тройной точки дейтерия. Отжиг в течение 10 мин при T=19.8 К. Разрежение в камере 0.035 тор.*



Рис.1.22. Процесс кристаллизации прозрачного слоя водорода с примесью HD (0.3%) при напуске в камеру теплообменного гелия.

Оболочки из стекла диаметром 450-500 мкм, давление заполнения 30 атм (при 300 К); температура стенок камеры T=7 К. (а) в оболочках сформирован прозрачный слой; разрежение в камере 0.01 тор, (б)-(г) - в камеру поступил газ гелий при давлении 5 тор; (б) начало процесса кристаллизации; (г) – завершение процесса кристаллизации.

Наши эксперименты подтвердили, что наличие в изотопе высокоплавких примесей повышает термостойкость прозрачного слоя. Например, при наличии в H₂-слое примеси более высокоплавкого изотопа HD, слой сохраняет свою прозрачность вплоть до тройной точки водорода и выше, если нагрев идет не очень медленно (Рис.1.7). Однако, напуск *в* камеру теплообменного гелия, температура которого несколько выше температуры стенок камеры, до давления всего несколько тор, приводит к полной рекристаллизации слоя (Рис.1.22). Точно такой же прием в отношении оболочек, содержащих прозрачный слой дейтерия с добавкой неона, не приводит к рекристаллизации прозрачного слоя.

Из этих наблюдений следует, что энергетический барьер между метастабильной (стекло) и стабильной (кристалл) фазами в смеси H₂/HD ниже, чем в смеси D₂/Ne. Соответствующие температуры плавления этих веществ: 13.96 К для H₂, 16.6 К для HD, 18.65 К для D₂, 24.54 для Ne. Значит, термостойкость прозрачного слоя тем больше, чем больше различаются температуры плавления примеси и основного компонента: в смеси H₂/HD это различие составляет ΔT = 2.64 K, в смеси D₂/Ne - ΔT = 5.89 K. Эти результаты находятся в соответствии с данными работ [32-34].

Итак, наши экспериментальные исследования показали:

- Рекристаллизация прозрачных слоев из чистых изотопов водорода происходит при первом нагреве до T_a~ 0.5T_{тр}
- Существенное увеличение термостойкости прозрачных слоев из изотопов водорода происходит при введении в них высокоплавких примесей
- Более высокоплавкие примеси из Ne обеспечивают большую термостойкость прозрачного слоя, чем менее высокоплавкие примеси из HD.

Отметим, что исследованные нами прозрачные криогенные слои состоят из веществ с Ван-дер-Ваальсовой связью между молекулами, в то время как хорошие стеклообразователи являются веществами с ковалентной (направленной) связью. Конечно, физика образования и микроструктура стекол с ковалентной и Ван-дер-Ваальсовой связью различна. Тем не менее, существуют универсальные эмпирические закономерности, их объединяющие [50,51].

Проведенные исследования позволяют прийти к следующему заключению:

- Состояние криогенного слоя (относительно устойчивая прозрачная модификация), полученного при средней скорости вымораживания изотопа водорода в присутствии более высокоплавкой примеси, по-видимому, представляет собой нестабильное стеклообразное состояние, которое, в процессе изотермического отжига либо медленного циклического нагрева-охлаждения, претерпевает структурную релаксацию в состояние метастабильного стекла.
- Тип и количество примеси определяет высоту энергетического барьера между метастабильным стеклообразным и стабильным кристаллическим состояниями, т.е. устойчивость прозрачного слоя к воздействию ТЦО.

Заметим, что указанное состояние твердых водородов, которое мы условно назвали «водородное стекло», получено впервые.

Следует отметить, что методика изготовления оболочек и процедура их заполнения газом может повлиять на условия формирования слоя и его характеристики, поскольку в системе «оболочка + смесь» могут содержаться небольшие примеси окиси углерода, двуокиси углерода, окиси азота и т.д. Нельзя также исключить возможности иных толкований результатов проведенных исследований.

§6. Влияние вибраций на структуру криогенного слоя

Из литературы известно, что наличие внешних периодических воздействий на расплав в процессе его кристаллизации позволяет регулировать дисперсность твердого вещества [58]. Внешнее воздействие приводит к тому, что, начиная с некоторого момента времени, определяемого амплитудой и частотой волны, рост зародышей кристаллической фазы прекращается. Дальнейшая их эволюция происходит двумя путями:

1. часть зародышей полностью растворяется

2. выжившие зародыши попадают в режим динамического равновесия, при котором размеры их осциллируют около постоянного значения, а их концентрация во времени уже не меняется.

При этом растворение наиболее быстро происходит в низкочастотном поле, когда частота внешнего воздействия ω меньше обратного времени диффузии растворенного (или осажденного) вещества (τ)⁻¹ [58]:

$$\omega < 1/\tau \sim D/d^2 \tag{1.7}$$

где D – коэффициент самодифузии изотопа, τ - время диффузии молекулы на расстояние d, равное характерному размеру микро неоднородности среды.

Коэффициент самодиффузии жидких изотопов водорода в районе тройной точки составляет ~5·10⁻⁹м²/сек [21,стр.108]. Откуда следует, что пороговая частота для образования слоя твердого дейтерия с размером микро неоднородностей ~1 мкм составляет 5 кГц, а для получения дисперсности на уровне 0.1 мкм – 500 кГц.

В серии экспериментов нами изучена возможность диспергирования криогенного слоя за счет периодических механических воздействий на расплав в процессе его кристаллизации, а также совместное воздействие двух диспергирующих факторов: скорости охлаждения расплава и частоты вибраций. В этих исследованиях использовался пьезо-вибратор, который размещался внутри тестовой камеры модуля формирования. Принцип действия вибратора основан на обратном пьезо-электрическом эффекте. Схема и общий вид тестовой камеры с вибратором показаны на Рис.9 (а,б) (см. Приложение к настоящей главе). В экспериментах также использовались оболочки из стекла диаметром 0.4÷0.6 мм и полистирола диаметром 1.0÷1.8 мм, заполненные газообразным дейтерием или водородом под давлением 100-300 атм при 300 К. Частота вибраций варьировалась в пределах 0.3 Гц-3 МГц, скорость охлаждения оболочки варьировалась в пределах от 10⁻⁵ до 30 К/сек.

Эксперимент проводился следующим образом. Оболочки, с предварительно вымороженным слоем, размещались на пьезо-пластине вибратора, установленного в оптиче- ской тестовой камере модуля формирования. Далее, оболочка нагревались до температуры, при которой вещество слоя полностью переходило в жидкую фазу. После чего осуществлялось охлаждение оболочки (через пятно контакта с охлаждаемой пьезо-пластиной) в присутствии либо в отсутствие вибраций.



Рис.1.23. Результаты исследования по диспергированию криогенного слоя при воздействии вибраций на расплав в процессе его охлаждения с различной скоростью. Условия эксперимента: (а-б) оболочка из полистирола 2R=1.2 мм, 300 атм D₂ (300 K), (в) оболочка из стекла 2R=0.6 мм, 220 атм H₂+2%D₂ (300K); частота вибраций 1-2 кГц; режим – беспорядочное вращение. Внизу – увеличенная структура слоя. Пояснения: (а) вымораживание D₂-слоя при скорости охлаждения 30 К/мин, начальная температура оболочки T_{in} =21.3 K, конечная температура T_{form} =5.8 K; (б) вымораживание D₂-слоя при скорости охлаждения 1.5 К/мин, ки T_{in}=22.8 K, T_{form}=10.8 K; (в) вымораживания H₂-слоя (2% добавки D₂) при скорости охлаждения 0.001 К/мин, T_{in}=15 K, T_{form}=10.6K

Предварительные исследования показали, что вариация скорости охлаждения расплава, находящегося внутри вибрирующей оболочки, позволяет получить твердый слой с различным уровнем дисперсности. Результаты этих исследований иллюстрирует Рис. 1.23.

На основании проведенных исследований можно сделать заключение, что периодическое внешнее воздействие на расплав в сочетании с различным темпом охлаждения позволяет эффективно управлять дисперсностью структуры образующегося твердого слоя.

§7. Тепловое разрушение криогенного слоя

Исследования закономерностей массопереноса изотопов водорода под действием разности температуры вдоль поверхности слоя показали, что слой, находящийся в состоянии «водородного стекла», более устойчив к воздействию тепловых нагрузок, чем кристаллический. Покажем это.

Эффект миграции твердого топлива при наличии градиента температуры связан с общей тенденцией всякой системы к переходу в состояние равновесия с минимальной энергией. Причиной переноса вещества, заключенного в замкнутую неизотермическую оболочку, является закономерное уменьшение давления его насыщенных паров при понижении температуры.

Поэтому, если под влиянием внешних условий вдоль свободной поверхности криогенного слоя появляется разность температуры, то возникает поток мо-
лекул насыщенного пара, направленный в наименее нагретую область. Избыток пара над менее нагретой поверхностью конденсируется, а его недостаток над более нагретой поверхностью восполняется за счет испарения. Величина нескомпенсированного потока молекул, возникающего в данном процессе переноса, подчиняется уравнению Герца-Кнудсена:

$$dN/(dtdS) = C(P-P_e)/(2\pi mkT)^{1/2}$$
 (1.8)

где Р и Р_е равновесное и реальное давление пара в системе, т - масса молекулы, k – постоянная Больцмана, C - коэфициент испарения (конденсации).

В приближении идеального газа (число Кнудсена Kn > 0.01) из (1.8) легко получить соотношение для времени образования возмущения формы слоя Х:

$$t = \frac{0.52 \text{ X}\rho \sqrt{R_g T_0}}{C P (c-b/T_0^2)(\frac{\Delta T}{W})}$$
(1.9)

где ρ - плотность конденсата при температуре T_0 , с и b – константы, $R_g = k/m$, ΔT - максимальная разность температуры на внутренней поверхности слоя, T_0 – средняя температура слоя, причем $\Delta T \ll T_0$.

Заметим, что выражение (1.9) позволяет определить лишь нижнюю границу времени нарастания возмущения формы криогенного слоя, поскольку оно получено в предположении, что число Кнудсена Kn > 0.01. В случае вязкого течения газа (Kn < 0.01), которое возникает, в зависимости от размеров паровой полости в центре мишени, при температурах T > 12÷15 K (для D₂-слоя) и при T > 9÷12 K (для H₂-слоя), процесс переноса молекул будет тормозиться за счет диффузионного сопротивления паро-газовой среды. Поэтому, темп нарастания разно-

толщин-ности неизотермичного слоя в этой области будет несколько снижен по сравнению с оценками по формуле (1.9).

В Таблице 1.7 приведены результаты расчетов характерного времени образования 2% разнотолщинности и 0.1 мкм локальной неоднородности для различных ΔT на поверхности слоя в сравнении с

Таблица 1.7. Результаты расчётов характерного времени образования разнотолщинности 2% (τ_1) и локальной неоднородности 0.1 мкм (τ_2) в мишени Накаи

ΔΤ, Κ	$ au_1$, мсек	$ au_2$, мсек	t, мсек
0.1	$2 \ 10^{10}$	$2.5 \ 10^8$	
0.01	44	5.5 10-1	48
0.1	4.4	5.5 10 ⁻²	
1	0.44	5.5 10-3	
	ΔT, K 0.1 0.01 0.1 1	ΔT, K $τ_1$, мсек 0.1 2 10 ¹⁰ 0.01 44 0.1 4.4 1 0.44	$\begin{array}{c c c c c c c c c c c c c c c c c c c $

^{*/}Параметры мишени Нака
и [59]: СН оболочка Ø 4 мм, толщиной 45 мкм, DT-слой толщиной 20 мкм

временем (t) нагрева мишени от 5 K до тройной точки D_2 (18.67 K) при полете внутри камеры реактора. В расчете полагалось, что мишень находится под воздействием только теплового излучения стенок камеры реактора, причем тепловой поток на мишень составляет 12 BT/см².

Как следует из Таблицы 1.7, возникновение локальных неоднородностей является значительно более серьезной проблемой порчи криогенного слоя, чем его искажение по толщине. Другой вывод из проведенных расчетов: для сохранения качества криогенной мишени в процессе ее доставки неоднородность температуры на свободной поверхности слоя должна быть минимальной. Заметим, что даже при симметричном теплопритоке на внешнюю поверхность мишени существует вероятность образования неоднородности температур вдоль поверхности криогенного слоя в процессе нагрева мишени. Дело в том, что в кристаллических диэлектриках, к которым относятся изотопы водорода в равновесном твердом состоянии, основную роль в механизме теплопереноса играет передача энергии связанных колебаний узлов кристаллической решетки. Согласно теории Дебая, коэффициент решеточной теплопроводности (λ) прямо пропорционален значению скорости (v) распространения упругих волн (скорости звука) в кристалле:

$$\lambda = (1/3)cv\Lambda \tag{1.10}$$

где с – теплоемкость единицы объема вещества, Λ - средняя длина свободного пробега фононов, которая является кинетической характеристикой, аналогичной средней длине свободного пробега молекулы.

Средняя скорость движения упругих волн в кристалле слабо зависит от температуры. Напротив, длина свободного пробега фононов увеличивается с понижением температуры, пока не достигнет размеров кристалла, и существенно снижается при наличии в кристалле дефектов (примесей, дислокаций вакансий и др.). В температурном диапазоне существования

твердой фазы D₂-топлива (T = 4.2-18.65 K), температура Дебая $\theta >>$ T (θ = 105 ± 6 K [60]). В этом случае теплопроводность кристаллического образца толщиной *d*, в отсутствии дефектов определяется соотношением:

$$\lambda \approx (1/3) cvd \qquad (1.11)$$

В равновесных условиях при T > 4.2 К твердый водород и дейтерий представляют собой кристаллы с ГПУ решеткой, характерные параметры которой определяются известными соотношениями с/а=1.623-1.633 (n-H₂) и с/а=1.60-1.634 (n-D₂) [61]. В отличие от изотропных сред, в таком кристалле скорость распространения упругих (звуковых) волн, их поляризация и поглощение зависят от направления распространения звука относительно кристаллографических осей. Например, скорость продольного звука в монокристалле п-Н₂ (75% орто-компоненты) составляет 2230 м/сек в направлении главной кристаллографической оси и 2030 м/сек в перпендикулярном оси направлении [17]. Расчетная зависимость скорости



Рис.1.24.Зависимость скорости распространения звука в ГПУ-решетке монокристалла п-H₂ от угла α между кристаллографической осью и направлением распространения звука (график взят из работы [17])

распространения звука в ГПУ-решетке нормального водорода от угла α между кристаллографической осью и направлением распространения звука показана на Рис.1.24. Минимальное значение скорости звука (~1840 м/сек) соответствует случаю, когда звук распространяется под углом ~50⁰ к направлению главной кристаллографической оси. Таким образом, различие в скорости продольного звука достигает 19%. Еще больше различие в скорости распространения поперечного звука, которое достигает 33%.

Результаты моделирования тепловой деградации топливного слоя с различным уровнем дисперсности было проведено авторами в работах [14,20]. Эти исследования подтвердили, что:

- рост шероховатости при нагреве мишени в процессе доставки является неотъемлемым свойством анизотропного кристаллического слоя (даже при симметричном теплопритоке);

- процесс роста шероховатости отсутствует, если слой находится в ультрадисперсном состоянии.

Как показали наши расчеты, структура топливного слоя существенно определяет риск разрушения мишени под действием тепловых нагрузок, возникающих в процессе доставки. Максимальным риском разрушения обладает мишень с анизотропным кристаллическим топливным слоем, а минимальным — мишень со слоем, находящимся в ультрадисперсном состоянии, как вариант, в состоянии типа «водородное стекло».

§8. Рекомендации по выбору оптимальной структуры криогенного слоя

Принципиально неустранимыми источниками разрушения криогенного слоя, возникающими в процессе доставки мишени, являются:

1. Механическое разрушение слоя под действием перегрузок (стадия ускорения мишени). Чтобы избежать этого механизма разрушения (без изменения габаритов инжектора) необходимо снизить скорость инжекции мишени.

2. Тепловое разрушение слоя под воздействием внешних теплопритоков на мишень (стадия полета инжектированной мишени в камере реактора). Чтобы избежать этого механизма разрушения необходимо снижать время пребывания мишени в камере, т.е. повышать скорость инжекции мишени.

Мы имеем, таким образом, два взаимно исключающих требования на скорость инжекции мишени в камеру реактора. Возможный путь решения проблемы - это формирование изотропного термостойкого топливного слоя. В этом случае время допустимого пребывания мишени в камере - максимально, так что скорость инжекции может быть выбрана минимальной.

В серии экспериментов, проведенных авторами [7,25,26,36-39], а также в экспериментах, проведенных в ряде зарубежных лабораторий [3,23,24], были изучены свойства различных состояний твердого топлива (монокристаллы, крупно- и мелкозернистые кристаллические структуры, аморфно-нанокристалличечское состояние) и определены условия получения и деградации твердого водорода и его изотопов в этих состояниях.

Экспериментальные исследования показали, что тепловая устойчивость получаемых структур достигается за счет подбора определенных легирующих добавок к основному компоненту топлива, а уровень дисперсности структуры можно регулировать за счет изменения скорости и симметрии охлаждения. Обнаруженные интервалы скорости охлаждения топливного вещества для формирования заданного состояния его структуры показаны на Puc.1.25, а условия температурной деградации прозрачного твердого слоя с различной структурой - на Puc.1.26.



Рис.1.25. Примерные интервалы скорости охлаждения топливного вещества для получения твердого криогенного слоя в заданном структурном состоянии



Рис.1.26. Тепловая устойчивость прозрачного твердого криогенного слоя, находящегося в различных структурных состояниях. (а) структуры. неустойчивые по отношению к температурной обработке, (б) термостойкий прозрачный слой

Преимущества, которые дает уникальный комплекс свойств «водородного стекла» при доставке мишеней в зону облучения иллюстрирует Рис.1.27. На рисунке показана тепловая история криогенной мишени, находящейся в вакуумной камере под воздействием только теплового излучения стенок камеры. Расчет проведен для мишени реакторного класса в предположении, что поток излучения величиной 12 Вт/см² полностью поглощается внешней поверхностью мишени [62,63]. Из расчетов следует, что топливо в состоянии «водородное стекло» способно «прожить» в камере более чем в 2.5 раза дольше, чем другие модификации. Таким образом, применение «водородного стекла» позволяет снизить температуру инжекции мишени от 17 К (нижняя граница существования гладкого слоя в состоянии монокристалл) до 5 К, а соответствующую скорость инжекции - от 400 м/сек до 120 м/сек, что резко снизит риск механического разрушения топливного слоя вследствие перегрузок.

Дополнительные преимущества, которые дает использование «водородного стекла»:

- 1. Снижение габаритов инжектора
- 2. Снижение перегрузок в процессе ускорения мишени в инжекторе
- 3. Осуществление ускорения мишени при T=5 К, т.е. в области, где прочность твердых изотопов водорода примерно в 2 раза выше, чем в районе T=17 К (справочные данные для поликристаллических образцов см. в [21,64]).

Следует упомянуть тот факт, что в случае аморфных веществ, отсутствие дальнего порядка в расположении атомов, а также отсутствие дефектов, свойственных кристаллическому состоянию, приводит к тому, что предел прочности, например, металлических стекол приближается к теоретическому значению E/50 (Е-модуль Юнга), что существенно выше соответствующих значений для кристаллических сплавов ($\sigma \approx E/10^5 - E/10^2$) [54,65]. Поэтому, можно ожидать, что криогенный слой в состоянии «водородное стекло» будет более прочным, чем в кристаллическом состоянии. Этот эффект дополнительно снижает риск разрушения слоя под действием перегрузок, возникающих при ускорении мишени до необходимой скорости инжекции, а также под действием тепловых нагрузок (радиального градиента температуры), которые возникают при инжекции мишени в камеру реактора, содержащую заметное количество остаточных газов.



Рис.1.27. Тепловая история мишени внутри вакуумной камеры под воздействием только теплового излучения стенок камеры реактора мощностью 12 Вт/см². Параметры: диаметр оболочки из полистирола 4 мм, толщина стенки оболочки 45 мкм, толщина D₂-слоя 200 мкм (мишень «Накаи» [59]); Т_{инж}- температура инжекции

ЗАКЛЮЧЕНИЕ к Главе 1

Анализ научной библиографии и собственных экспериментальных и теоретических данных позволяет заключить следующее:

1. На основании проведенных исследований впервые показано, что изотопы водорода и их смеси можно получить в виде ультрадисперсных модификаций (или наносистем), которые характеризуются новыми, зачастую уникальными свойствами.

2. Основные области использования конкретно получаемых модификаций обуславливаются особенностями их свойств, в свою очередь, определяемых высокой дисперсностью, составом и структурой. Поскольку в наших экспериментах не проводилось измерений* структурных особенностей формируемых криогенных слоев, то в дальнейшем изложении мы останемся в рамках нейтральной терминологии, и будем использовать термин ультрадисперсные слои криогенного топлива (см. Главу 2).

Подчеркнем, что на данный момент единой терминологии, как и общепринятого определения верхней границы размеров морфологических элементов наносистем (радиуса частиц, толщины пленки, диаметра кристалла или трубки), еще не сложилось. Например, высказываются предложения ввести понятие элементарной единицы кристаллического твердого тела, или кванта кристалла, или мика (минимального кристалла). Мик есть такое минимальное количество кристаллического твердого тела, которое еще сохраняет нормальные («предельные») свойства, характерные для массивного образца данного вещества. Размеры мика для различных веществ лежат в пределах $10^{-7} - 10^{-8}$ м. Наиболее вероятное значение 30–40 нм. Однако окончательного решения по этому вопросу еще нет.

■ Минимизация температуры инжекции

Ультрадисперсные модификации топлива устойчиво существуют в широком диапазоне температур от 5 К до $T_{\rm rp}$, что позволяет снизить температуру инжекции мишени от общепринятого уровня (17 К) до 5 К, т.е. более чем в 3 раза. В свою очередь, это позволяет снизить скорость инжекции, т.е. минимизировать риск разрушения слоя вследствие перегрузок, возникающих в процессе ускорения. Кроме того, ускорение мишени можно осуществлять при температурах, когда прочность твердых водородов примерно в 3 раза выше, чем при 17 К.

■ Снижение интенсивности процессов тепломассопереноса

– Введение в состав топлива добавок более высокоплавких компонентов

Согласно разработанной методологии, ультрадисперсные модификации изотопов водорода и их смесей получаются именно при введении в топливо высокоплавких добавок. В смеси DT_x роль такой добавки играет тритий (при x \leq 20%). В этих случаях процесс тепломассопереноса под действием разности температур проходит менее интенсивно, чем для слоя без примесей.

– Минимизация неоднородности температуры на поверхности слоя

Формирование топлива в виде ультрадисперсных слоев позволяет свести к минимуму неоднородность температуры на внутренней поверхности слоя, т.е. снизить скорость роста

^{*/} по вопросу диагностики получаемого криогенного слоя см. п.5.1 настоящей главы.

^{3.} Проведенное в работе сравнение свойств твердого топлива, находящегося в различных структурных модификациях, позволило заключить, что топливный слой в ультрадисперсном состоянии позволяет решить большинство проблем, которые на сегодняшний день крайне актуальны для реализации целей ИТС, в том числе:

возмущений слоя в высоких и низких гармониках и обеспечить требуемое качество топлива непосредственно в фокусе мощной лазерной установки.

Таким образом, отличительные особенности ультрадисперсных слоев позволяют определить их как новый тип твердого топлива, применение которого минимизирует риск механического и теплового разрушения криогенной мишени в процессе ее доставки в зону термоядерного горения.

Литература к Главе 1

- D.N.Bittner, G.W.Collins, E.Monsler, S.Letts. *Infra-Red Redistribution of D₂ and HD Layers* for ICF. J.Vac.Sci.Technol. A14(5), 2897, 1996; J.Sater, et al. *Cryogenic DT-Fuel Layers* Formed in 1 mm Spheres by Beta-Layering. Fusion Technology 35, 229, 1999
- 2. D.T.Goodin, et al. *Demonstrating a target supply for inertial fusion energy*. Proceed. 3rd IAEA RCM on Physics and Technology of IFE Targets and Chambers (11-13 October, 2004, Daejon, Rep.Korea), <u>http://aries.ucsd.edu</u>
- 3. T.Norimatsu, et al. *Update for the drag force on an injection pellet and target fabrication for inertial fusion*. Fusion Sci.Technol. **43**, N3, 339, 2003
- 4. S.Skupski, et al. *High-gain direct-drive target designs for the National Ignition Facility*. In: Inertial Fusion Science and Applications 2001 (eds.K.Tanaka et al.) ELSEVIER, 240, 2002
- D.R.Harding, T.B.Jones, D.D.Meyerhoffer. *Mass production of targets for Inertial Fusion Energy*. Proceed., 5th IAEA TM on "Physics and Technology of Inertial Fusion Energy", Vienna, Austria, March 24-26, 2010
- 6. K.Nagai. *Encapsulation of low density plastic foam materials for the fast ignition targets and their mass production using microfluid devices*. Proceed. IAEA 3rd RCM on Pathways to energy from Inertial Fusion: an integrated approach, Vienna, Austria, March 22-24, 2010
- E.R.Koresheva, I.E.Osipov, I.V.Aleksandrova. *Free-standing target technologies for inertial confinement fusion: fabrication, characterization, delivery*. Laser and Particle Beams, 23, 563, 2005
- 8. I.V.Aleksandrova, S.V.Bazdenkov, V.I.Chtcherbakov, et al. *An efficient method of fuel ice formation in moving free standing ICF / IFE targets.* J.Phys.D: Appl.Phys. **37**, 1163, 2004
- 9. И.Д.Морохов, В.И.Петинов, Л.И.Трусов, В.Ф.Петрунин. Структура и свойства малых металлических частиц. УФН **133**, 653, 1981
- 10. M.S.Tillak, et al. *A Target Fabrication and Injection Facility for Laser-IFE*. Fusion Engineering, 624, 2003; <u>http://aries.ucsd.edu/LIB/REPORT/CONF/SOFE03/ TillackAbs.pdf</u>
- 11. M.A.Meyers, A.Mishra, D.J. Benson. *Mechanical properties of nanocrystalline materials*. Progress in Materials Science. **51**, 427, 2006
- 12. Л.Д.Ландау, Е.М.Лифшиц. Статистическая физика. Часть 1. Издание 4-е. М.: Наука, 1995
- Proceed. 1st IAEA RCM on *Elements of IFE Power Plants* (Vienna, Austria, 21-24 May, 2001);
 3rd IAEA TM on *Physics and Technology of IFE Targets and Chambers* (Daejon, Rep. Korea, 11-13 October, 2004); 1st IAEA RCM on *Pathways to Energy from Inertial Fusion An Integrated Approach* (Vienna, Austria, 6-10 November 2006);

15. R.C. Cook. *A model study of the possible effect of beryllium grain sound speed anisotropy on ICF capsule implosions*. Fusion Sci.Technol. **41**, 155, 2002

Research 29, N5, 419, 2008

- 16. E.M.Bringa, et al. *Atomistic modeling of wave propagation in nanocristals*. J.Minerals, Metals and Materials Soc. **57**, №9, 67, 2005
- R.Wanner, H.Meyer. Sound velocity in solid hydrogen and deuterium. Phys.Lett. A 41, N3, 189, 1972
- 18. И.А.Гиндин, Я.Д.Стародубов, В.К.Аксёнов. Структура и прочностные свойства металлов с предельно искаженной кристаллической решеткой. Металлофизика **2**, №2, 49, 1980
- 19. А.С.Бакай. Поликластерные аморфные тела. М.,Энергоатомиздат, 1987, 190с.
- И.В.Александрова, Е.Р.Корешева, Е.Л.Кошелев, и др. К решению проблемы сохранения параметров криогенной мишени в процессе ее доставки в зону термоядерного горения. Вопросы Атомной Науки и Техники, сер. Термоядерный синтез, 3, 27, 2007
- 21. Б.И.Веркин, В.Г.Манжелий, В.Н.Григорьев и др. *Свойства конденсированных фаз водорода и кислорода*. Справочник. Киев: Наукова Думка, 1984, 240 с
- 22. Б.И.Кидяров. *Кинетика образования кристаллов из жидкой фазы*. Новосибирск: Наука, 1979, 134 с.
- 23. G.W.Collins. *Structure of vapor-deposited solid hydrogen films*. Proc.10th Target Fabrication Meeting, Taos, NM, February 1995
- J.R.Miller. A new method for producing cryogenic laser fusion targets. Adv. Cryo. Engineering, 34 (4), 669, 1979
- 25. Е.Р.Корешева. Структура Криослоя в Термоядерных Мишенях. Краткие Сообщения по Физике, №12, 35, 1984
- 26. E.R.Koresheva, Yu.A.Merkuliev, A.I.Nikitenko, I.E.Osipov, S.M.Tolokonnikov. *The Peculiarities of Laser Cryogenic Targets Destruction and their Injection into a Powerful Laser Focus*. Laser and Particle Beams, **6** (2), 245, 1988
- 27. К.А.Осипов. Аморфные и ультрадисперсные кристаллические материалы. 1972 г.
- 28. J.E.Burke Atom Movements, ASM, Cleveland, 1951, 209 p.
- 29. R.L.Fullman. Metal Interfaces, ASM, Cleveland, 1952, 179 p.
- 30. Л.Н.Лариков, В.В.Гейченко, В.М.Фальченко. Диффузионные процессы в упорядоченных сплавах. Киев: Наукова Думка, 1975
- 31. K.Lücke, K. Detert. A quantative theory of grain-boundary motion and recristallization in metals in the presence of impurities. Acta Metallurgica 5, 628, 1957
- 32. C.G.Granqvist. Comment on "*Preparation of amorphous films of tin by quenching condensation with impurities*". Z. Phys. B, **21**, 127, 1975
- C.G.Granqvist, T.Claeson. Localized phonons and lattice order transformations in thallium based alloys by superconductive tunneling. Z. Physik, 269, 23, 1974; Thin, quench-condensed lead-based alloy films investigated by resistivity and superconducting tunneling measurements. J. Low Temp. Phys., 13, N1/2, 1, 1973

- 34. C.S.Barrett, L.Meyer, J.Wasserman. *Crystal Structure of Solid Hydrogen and Deuterium, and of Neon-Hydrogen and Neon-Deuterium Mixtures.* J. Chem. Phys. **45**, №3, 834, 1966
- 35. К.Судзуки, Х.Фудзиморо, К.Хасимото. *Аморфные металлы*. М.: Металлургия, 1987, 328 стр.
- E.R.Koresheva, I.E.Osipov, T.P.Timasheva, L.S.Yaguzinskiy. *The issue of homogeneous solid H₂- layers formation inside free-standing microshells*. in: Inertial Fusion Science and Application, State of the art 2001 (ELSEVIER), 767, 2002
- E.R.Koresheva, I.E.Osipov, T.P.Timasheva, L.S.Yaguzinskiy. A new approach to form transparent solid layer of hydrogen inside a microshell: application to inertial confinement fusion. J.Phys.D: Appl.Phys. 35, 825, 2002
- 38. E.R.Koresheva, I.V.Aleksandrova, I.E.Osipov et al. *Progress in the Extension of Free-Standing Target Technologies on IFE Requirements.* Fusion Sci. Technol. **35**, N3, 290, 2003
- 39. I.V.Aleksandrova, E.R.Koresheva, I.E.Ospov et al. *Ultra-fine fuel layers for application to ICF/IFE targets*. Fusion Sci. Technol. **63**, 106, 2013
- 40. Е.Р.Корешева, О.Н.Крохин, И.Е.Осипов, Т.П.Тимашева, Л.С.Ягужинский. *Криогенный слой топлива, топливное ядро и способ его получения*. Патент РФ, заявка № 2001121680 от 9 августа 2001
- 41. И.В.Александрова, А.А.Белолипецкий, Е.Р.Корешева и др. *Криогенные мишени для ре*актора. Часть І. Диффузионное заполнение топливом сферических оболочек. Препринт ФИАН, Москва- 2012 г., 134 стр.
- 42. В.Т.Ненарокомова, Н.Н.Рязанцева, Ю.А.Милешкин. Специализированные масс-спектрометры для определения изотопного состава водорода и гелия. Атомная Энергия, **76** (2), 120, 1994
- 43. V.I.Chtcherbakov, S.V.Bazdenkov, I.V.Aleksandrova. *Integrated FST-layering code for the optimization of fuel ice formation in moving ICF/IFE capsules*. Book of abstracts, p.166, 27th European Conference on Laser Interaction with Matter (Moscow, Russia, October 7-11, 2002)
- 44. P.C.Souers. *Hydrogen Properties for Fusion Energy*. Lawrence Livermore National Laboratory, Univ. California Press, 1976, 203 p.
- 45. C.S.Barnett, L.Meyer, J.Wasserman. *Crystal Structure of Solid Hydrogen and Deuterium, and of Neon—Hydrogen and Neon—Deuterium Mixtures.* J. Chem. Phys. **45** (3), 834, 1966
- 46. Н.Н.Гальцов, А.И.Прохватилов, М.А.Сржемечный. Влияние примеси молекул H2 на структуру и параметры решетки Ne. Физика Низких Температур **30** (12), 1307, 2004
- 47. R.J.Good, G.V.Ferry. The wetting of solids by liquid hydrogen. Adv.Cryo.Eng. 8, 306,1963
- 48. И.В.Золотухин, Ю.Е.Калинин. Аморфные металлические сплавы. УФН 160 (9), 75, 1990
- 49. Я.И.Френкель, Введение в теорию металлов, Л.: Наука, 1972, 424 с.
- 50. Г.М.Бартенев. *Природа стеклования*. Сб. Докладов Всесоюзного семинар «Новые идеи в физике стекла», стр.3-21, Москва, 9-10 октября 1987 г.,
- 51. Г.М.Бартенев. *Строение и механические свойства неорганических стекол*. Москва, Изд. Литературы по Строительству, 1966, 212 с.
- 52. О.В.Мазурин. Стеклование и стабилизация неорганических стекол. Л.: Наука, 1978, 621стр.

- А.И.Шальников. Сверхпроводящие свойства тонких металлических слоев. ЖЭТФ 10 (6), 630, 1940
- 54. И.В.Золотухин, Ю.Е.Калинин, О.В.Стогней. *Новые направления физического материаловедения*. Изд. Воронежского государственного университета, 2000 г. 360 стр.
- 55. Е.М.Лифшиц, Л.П.Питаевский. Физическая кинетика. М.Наука, 1979, 673 стр.
- 56. G.Grimval, S.Sjodin. Correlation of properties of materials to Debye and melting temperatures. Physica Scripta **10**, 340, 1974
- 57. В.П.Захаров, В.С.Герасименко. Структурные особенности полупроводников в аморфном состоянии. Киев: «Наукова Думка», 1976, 280 стр.
- 58. В.Н.Нишанов, А.А.Собянин, Э.Н.Цой. Пороговый характер диффузионного роста зародышей новой фазы во внешнем периодическом поле. Краткие Сообщения по Физике №1, 18, 1987
- 59. S.Nakai, J.Miley. *Physics of high power laser and matter interactions*. Word Scientific Publishing, Singapore, 1992, 87 p.
- 60. Г.Н.Щербаков. *Рентгеновские исследования твердого нормального дейтерия*. Физика Низких Температур **17**, №2, 139, 1991
- 61. H.M.Roder, G.E.Childs, R.D.McCarthy, P.E.Angerhofer. Survey of the properties of the hydrogen isotopes below their critical temperature. NBS Technical Note, Monograph 74, 1965
- 62. B.V.Kuteev. *Interaction of Cover and Target with Xenon Gas in the IFE-Reaction Chamber*. Research Report NIFS-718, National Institute for Fusion Science, Japan, Nov. 2001
- I.E.Osipov, E.R.Koresheva, G.D.Baranov, et al. *A device for cryotarget rep-rate delivery in IFE target chamber*. in: Inertial Fusion Science and Application, State of the art 2001 (eds. K.A.Tanaka et al.), ELSEVIER, 810, 2002
- 64. М.П.Малков, И.Б.Данилов, А.Г.Зельдович, А.Б.Фрадков. *Справочник по физикотехническим основам криогеники*. под ред М.П.Малкова. М. Энергия, 1973, 392с.
- 65. H.S.Chen. Glassy metals. Rep.Prog.Phys. 43, N4, 353, 1980



Приложение к Главе 1

Экспериментальный FST-комплекс

Для формирования твердого криогенного слоя, оболочку, содержащую тот или иной изотоп водорода, необходимо охладить ниже температуры тройной точки изотопа (T_{тр}). Равновесным, термодинамически устойчивым состоянием изотопов водорода при этих температурах является кристаллическое состояние, в котором изотопы представляют собой молекулярные кристаллы. В ведущих лабораториях мира ведутся исследования в направлении создания криогенного слоя именно с кристаллической структурой.

В ФИАН проведен цикл исследований, направление которых отличается от общепринятого в мире подхода. Нами были исследованы возможности сформировать твердый слой из изотопов водорода в изотропном ультрадисперсном состоянии. Целью этих исследований являлось формирование водородного слоя в состоянии, которое способствует наибольшей эффективности сжатия мишени, а также обладает б0льшей устойчивостью к внешним тепловым и механическим воздействиям, чем равновесный кристаллический водород.

Ультрадисперсное твердое состояние слоя мы получали при воздействии на расплав изотопа водорода таких факторов, как (1) высокая скорость охлаждения, (2) периодическое механическое воздействие, (3) наличие и тип легирующих примесей, а также при сочетании этих факторов. Известно, что данные способы позволяют получать ультрадисперсные (включая аморфные и нанокристаллические) полупроводники, металлы и сплавы. Однако, такие материалы, как твердые изотопы водорода, в подобном состоянии ранее никем не были получены, и, соответственно, не исследовались. Кроме того, отличительной особенностью нашего подхода являлось формирование топливного слоя внутри замкнутого микрообъекта (сферической оболочки), что потребовало разработки новых оригинальных устройств и методов реализации перечисленных факторов воздействия на формируемый криогенный слой. Важно также отметить, что исследования проводились, в основном, с незакрепленными, т.е. свободными от материального подвеса, мишенями (в английской аббревиатуре «free standing targets» или **FST**).

Для реализации перечисленных выше условий формирования криогенного слоя внутри полых сферических оболочек и исследований его отклика на различные тепловые и механические нагрузки, в ФИАН был создан экспериментальный **FST**-комплекс.

§2. Основные подсистемы FST-комплекса

Экспериментальный FST-комплекс включает следующие основные подсистемы (см. Рис.1):

 Система заполнения (СЗ): автоматизированный комплекс устройств, предназначенных для заполнения полых сферических оболочек из стекла и полимеров рабочим газом до давлений от 1 до 1000 атм (при комнатной температуре) методом диффузии. Рабочий газ: нерадиоактивные изотопы водорода, при необходимости, включающие также добавки аргона, неона, гелия.

- 2. Установка для криогенных исследований (УКИ): комплекс устройств, предназначенных для исследования условий формирования криогенных топливных мишеней устойчивого ультрадисперсного топливного слоя на внутренней поверхности полой оболочки из стекла или полимера, предварительно заполненной рабочим газом.
- 3. Система характеризации (СХ): автоматизированный комплекс устройств, предназначенных для характеризации параметров полых оболочек и криогенных мишеней, а также для диагностики хода эксперимента.
- 4. Вспомогательные системы: газгольдер, система вакуумирования, системы газо- водо- и электроснабжения.

Отметим, что все элементы экспериментального комплекса работают с незакрепленными (бесподвесными) мишенями.



Puc.1.Специализированный экспериментальный FST- комплекс: основные подсистемы

§2. Система заполнения

Система заполнения (C3) представляет собой автоматизированный комплекс устройств, предназначенных для заполнения полых сферических оболочек из стекла и полимеров рабочим газом до давлений от 1 до 1000 атм методом диффузии. На Рис.2 показан общий вид C3 и результаты ее тестирования. С3 смонтирована в рабочем помещении, обеспеченном вытяжной вентиляцией с пятикратным обменом свободного объема в час. Система заполнения впервые запущена в работу в сентябре 1998 г. (с последующей модернизацией в 2005 г.). Детальное описание C3 дано в работе [7]. Здесь мы кратко перечислим основные рабочие характеристики системы:

1. Одновременное заполнение газом от 5 до 25 незакрепленных оболочек диаметром 0.4-2.0 мм

- 2. Рабочий режим: $\Delta P = \text{const}$ (режим ramp filling), P = const (режим step filling)
- 3. Рабочие газы: D_2 , H_2 , $D_2 + H_2$, инертные газы
- 4. Рабочие температуры: 300 К (полимерные оболочки), 650 К (стеклянные оболочки)
- 5. Точность подачи давления: не хуже 0,1 атм
- 6. Диапазон рабочих давлений: 1-1000 атм
- 7. Технический ресурс непрерывной работы под давлением до 1000 атм, не менее 500 час





(б) Оболочка из полистирола Ø 996 мкм была заполнена газообразным H₂ до 1000 атм при 300 K, а затем охлаждена до 32 K

Рис.2.Система заполнения. Общий вид (а) и результаты апробации системы (б)

§3. Установка для криогенных исследований

Общий вид установки для криогенных исследований (УКИ) показан на Рис.3. В установке использована система криообеспечения физического эксперимента типа УТРЕКС-1-РТА, изготовленного в СКТБ Физического приборостроения Института физики АН Украины и состоящая из криостата и бло ка регулирования температуры. Конструкция криостата позволяет изменять температуру в области оптического контроля образца в диапазоне 4.2-80 К с фиксацией заданного уровня температуры с точностью до ± 0.01 К.

Кроме того, в экспериментах используется оптический гелиевый криостат типа КГ-14, разработанный в Институте Физики Твердого Тела РАН (г.Черноголовка Московской обл.). Конструкция прибора позволяет изменять температуру шахты с находящимся в ней теплообменным гелием со скоростью 0.1÷10 К/сек в диапазоне температур 4.2÷40 К или поддерживать температуру постоянной в области размещения и оптического контроля образца с точностью ±0.01К (в диапазоне температур 4.2-35К). Вертикальный градиент температуры в области оптического наблюдения (нижняя часть шахты криостата) составляет 0.1÷0.3 К/см.



Рис.3. Экспериментальная установка для проведения криогенных исследований: (а) общий вид, (б) схема размещения основных элементов установки. 1 – модуль формирования в сборе с криостатом; 2–система оптического наблюдения; 3 – электронные блоки контроля температуры; 4 – устройства контроля вакуума и давления; 5 – видеомагнитофон с монитором; 6 – дисплей персонального компьютера, 7 - мишенный контейнер



Рис.4. Набор каналов формирования (а-г) и схема движения оболочек по каналам формирования различной геометрии (ж-з).

В комплект каждого криостата входит также набор специальных вставок (Рис.4, а- г), в состав которых входит канал формирования (КФ). Вставки применяются для формирования криогенного слоя внутри оболочки и ее доставки в зону оптического наблюдения (оптическую тестовую камеру). Схема движения оболочки по КФ с различной геометрией показана на Рис.4(д, е). Съемная тестовая камера изготовлена в нескольких модификациях: камера для горизонтального накопления оболочек, камера для вертикального накопления оболочек, а также томографическая тестовая камера (Рис.5, а-в). Криостат в комплекте со вставкой и оптической тестовой камерой называется модуль формирования (МФ).



Рис.5. Тестовая камера в различных модификациях и соответствующее расположение мишеней. а – камера с горизонтальным накоплением мишеней, б – камера с вертикальным накоплением мишеней, в – томографическая тестовая камера (ТТК), в1 – мишень на держателе устройства позиционирования, расположенного внутри ТТК.

Для транспортировки газонаполненных оболочек из системы заполнения в МФ, а также для подачи оболочек в КФ применялись специально разработанные мишенные контейнеры (МК).

На Рис. 6 показан МК для работы со стеклянными оболочками, заполненными до давления от 5 до 20 атм.



Рис.6. Схема и общий вид мишенного контейнера, предназначенного для работы со стеклянными оболочками при давлении заполнения до 20 атм

МК для работы с оболочками (полимерными и стеклянными), заполненными до давлений от 20 до 1000 атм показан на Рис.7а.

Мишенный контейнер имеет многофункциональное назначение, в том числе:

- Размещение массива пустых бесподвесных оболочек в камере заполнения,
- Хранение массива заполненных оболочек при 300 К (при необходимости),
- Транспорт этого массива при 300 К в модуль формирования.
- МК может быть использован в любой другой системе заполнения, что позволит этой системе работать с массивом оболочек.
- Миниатюрные размеры и функциональные особенности контейнера делают его удобным средством для транспортировки массива заполненных оболочек в любые лаборатории ИТС (Рис.7б).



Рис.7. Мишенный контейнер для работы с полимерными оболочками. (а) схема (справа) и общий вид (слева); (б) МК для доставки массива заполненных оболочек в любую лабораторию ИТС.

Процедура работы с мишенным контейнером включает несколько стадий:

- 1. размещение массива оболочек внутри мишенного контейнера;
- 2. размещение контейнера в камере заполнения;
- 3. заполнение оболочек газом до необходимого давления;
- 4. герметизация мишенного контейнера;
- 5. сбор отработанного газа в одном из накопителей, работающих на Ті сорбере;
- 6. сбор остаточного газа в накопителе, работающем на интерметаллиде ZrCrFe;
- 7. транспортировка мишенного контейнера в модуль формирования.

В процессе транспорта давление внутри и снаружи оболочек одинаково. Поэтому, в контейнере, кроме газа, содержащегося внутри заполненных оболочек, переносится также паразитный газ, заполняющий пространство вне оболочек. Модификация контейнера для нерадиоактивных водородов содержит 25 оболочек. Модификация, предназначенная для работы с DT-смесью содержит не более 10 оболочек при давлении ≤1000 атм, что удовлетворяет ограничениям по тритиевой радиоактивности для помещений 2-ой категории: не более 10 Кюри. Паразитный объем контейнера (~30%) по крайней мере, в 2.5 раза меньше, чем у подобного устройства, рассчитанного на работу с одной мишенью, укрепленной на подвесе.

Мишенный контейнер в течение ряда лет успешно использован нами в криогенных исследованиях. Как правило, в период с октября по июнь эксперименты проводились сразу же, или через несколько дней после заполнения массива оболочек. Специфика работы Криогенного отдела ФИАН не позволяла, однако, проводить криогенные эксперименты в период с июля по сентябрь, когда установки ожижения азота и гелия находятся на профилактике. В связи с этим, возможность использования МК для длительного хранения заполненных оболочек оказалась очень полезной и позволила оптимально организовать подготовку к осенним экспериментам. Летом проводилось заполнение нескольких партий оболочек. Каждая партия отличалась от других партий величиной давления заполнения и/или типом газа (H₂, D₂ или их смесь). Это позволяло позже, в удобное время проводить эксперименты, в которых использовались оболочки, заполненные различным типом топлива.

На Рис.8 продемонстрирована пригодность МК для длительного хранения заполненных оболочек. Полистироловая оболочка, после заполнения Н₂-газом до 206 атм, хранилась внутри



Рис.8. Оболочка из полистирола с вымороженным внутри нее слоем H_2 (T=12 K). После заполнения газом до 206 атм эта оболочка в течение 100 дней хранилась в мишенном контейнере при T = 300 K. контейнера в течение 100 дней при температуре 300 К. Затем эта оболочка была использована в криогенных экспериментах.

Для исследования воздействия внешнего периодического поля на криогенный слой в процессе его формирования использовалась ячейка-вибратор, которая размещалась

внутри тестовой камеры МФ. Схема и общий вид тестовой камеры с вибратором показаны на Рис.9 (а,б). Принцип действия вибратора основан на обратном пьезоэлектрическом эффекте. Частота внешних механических воздействий со стороны пьезо-пластины на оболочку может варьироваться в диапазоне от 0.3 Гц до 3 МГц. В зависимости от параметров входного сигнала (частота, амплитуда) оболочка, находящаяся на пьезо-пластине, могла совершать вращение, подскок или смешанное движение. Характер движения оболочки относительно пьезо-пластины при различной частоте и амплитуде сигнала показан на Рис.9в. Температура

пьезо-пластины могла изменяться в пределах от 4.2 К до 40 К со скоростью от 0.0001 К/сек до 50 К/сек, либо сохранять заданную температуру с точностью ±0.01 К. Данное устройство позволяет исследовать влияние вибраций на процесс кристаллизации слоя при фиксированной температуре, одновременное воздействие вибраций и скорости охлаждения на структуру слоя, устойчивость полученного слоя к различным внешним воздействиям на мишень.

Исходное орто-пара состояние газообразного водорода или дейтерия внутри

Таблица 2. Равновесное соотношение концентрации орто-пара водорода при различных температурах

Т, К	α	β, %
20	544.8	99.82
25	99.57	99.01
35	14.28	93.45
40	7.780	88.61
50	3.327	76.89
77	1.017	50.41
140	0.4208	29.62
273	0.3357	25.13
x	0.3333	25.0

T – температура H_2 , α - отношение концентрации молекул p- H_2 к концентрации молекул o- H_2 , β - содержание орто компоненты в водороде.

оболочки варьировалось в пределах от равновесного при комнатной температуре до равновесного при 20 К (см. Таблицу 2, данные для которой взяты из работы [8]). В отсутствие катализаторов, установление низкотемпературного равновесного орто-пара состава в жидком водороде происходит со скоростью примерно 0.5% в час, в соответствии с соотношением [8]:

$$x = [1/x_0 + c\tau]^{-1}$$

где x - молярная доля орто-H₂, τ - время превращения, x₀ – первоначальная доля *o*-H₂, константа с = 12,65·10⁻³ час⁻¹.

Необходимый орто-пара состав получался при выдерживании контейнера с заполненными оболочками при T = 20 К в течение расчетного времени, после чего контейнер нагревался и хранился при комнатной температуре вплоть до проведения криогенного эксперимента.



Рис.9. Устройство для исследования влияния вибраций на микроструктуру слоя. (а) Размещение вибратора внутри тестовой камеры модуля формирования. 1-вставка в криостат, 2- тестовая камера, 3-пьезо-пластина (вибратор). (б) Движение оболочки относительно пьезо-пластины при различных параметрах сигнала; (в) Зависимость амплитуды перемещения мишени от частоты управляющего импульса для различных напряжений при T=77К и U=75 B; 1- подскок, 2- вращение

§4. Система характеризации

Для изучения эволюции слоя при отжиге или циклическом нагреве использовалась система наблюдения с пространственным разрешением 2.5 мкм и временным разрешением - 40 мсек.

Диагностика параметров полых оболочек осуществлялась с помощью устройства *Shell Tester*, с пространственным разрешением 1.5 мкм в видимом диапазоне излучения. Устройство позволяет наблюдать качество сферической оболочки в 1000 проекций (Puc.10).

Для диагностики параметров криогенных мишеней использовалось устройство *FST-Tester*, с пространственным разрешением 1 мкм в видимом диапазоне излучения (0.49 мкм). Устройство позволяет изучать качество сферической оболочки и криогенной мишени в 100 проекциях (Puc.11).

Специальное программное обеспечение *Target Studio*, разработанное нами, позволяет осуществлять реконструкцию параметров исследуемой оболочки или криогенной мишени по набору соответствующих теневых проекций.

Детальное описание комплекса по характеризации оболочек и криогенных мишеней, созданный в ФИАН, дано в работах [9,10].

§5. Криогенный эксперимент

5.1. Порядок проведения эксперимента и методика измерений

Схема модуля формирования, использованного в экспериментах, показана на Рис.12. В экспериментах контролировался профиль температуры вдоль вставки с каналом формирования, а также измерялся уровень разрежения внутри элементов МФ. Система контроля состоит из миниатюрных германиевых датчиков сопротивления, приборов для контроля вакуума и электронных блоков измерительной аппаратуры. Датчики (производ- ство СКТБ АН Украины) укреплены на теплопроводном контакте в пяти различных точках вставки (включая КФ) и тестовой камеры. Для измерения зависимости R=R(T) использовался комбинированный прибор Щ-301-1 с погрешностью измерений 0.1-0.5 % (в диапазоне сопротивлений от нескольких Ом до нескольких десятков кОм). Система контроля обеспечивает измерение температуры с точностью до \pm (0.01-0.1) К (в диапазоне 4.2 - 100 К), уровня разрежения в элементах модуля формирования - до 1 мТор.

В экспериментах был исследован процесс разрушения полистироловых оболочек внутренним давлением газа при криогенных температурах [7]. По данным этих экспериментов были рассчитаны рабочие интервалы температур, возможных для разгерметизации МК и подачи заполненных оболочек из накопителя в КФ, в том числе:

(а) разгерметизация мишенной кассеты: 14 - 20 К (H₂), 19 - 23 К (D₂, смесь H₂+ D₂)

(б) подача заполненных оболочек из накопителя в канал формирования: 19 - 40 К.

Порядок работы с МФ для случая полимерных оболочек следующий. Сначала оболочки, размещенные внутри цилиндрического мишенного контейнера, заполняются газом до необходимого давления. Процедура заполнения описана детально в [7].





ROTATION AXIS



α=72°







α=216°







α=360°

Puc.10. Устройство Shell Tester для многопроекционной диагностики параметров полых оболочек

(а) общий вид, (б) схема: 1 - стойка; 2 - винт; 3 – кольцо; 4 – опора шаровая; 5 – фланец; 6 – втулка; 7 – кронштейн; 8 – лимб; 9 – чашка; 10 – магнит; 11 – трубка; 12 – втулка; 13 – капилляр; 14 – чашка; 15 – линейка; 16 – стопор; 17 – сектор; 18 – штуцер; 19 – винт микрометрический. (в) серия проекций оболочки из полистирола (внешний радиус 1676 µm; толщина стенки 43 µm; диаметр стеклянного капилляра 44 µm); условия сканирования: число проекций 100, угловой шаг 3.6 ⁰±1.5'



Рис.11. 100-проекционный видео-микро-томограф FST Tester

(а) схема сборки основных элементов в изометрии, (б) общий вид томографа в сборе с модулем формирования, (в) теневые изображения фрагментов криогенных мишеней (оптическое разрешение 1 мкм); 1 – полимерная оболочка $\emptyset = 1.5$ мм с жидким H₂-слоем (давление заполнения 253 атм), 2 – полимерная оболочка $\emptyset = 1.25$ мм с твердым D₂-слоем толщиной 50 мкм (давление заполнения 320 атм)

Процедура формирования криогенного слоя внутри бесподвесных оболочек имеет следующие особенности (см. Рис.12):

1. Размещение МК с массивом заполненных оболочек внутри МФ и охлаждение МК от 300 К до температуры разгерметизации. Время охлаждения занимает не более 30 мин.

2. Разгерметизация МК, удаление паразитного газа из МК, гравитационная инжекция бесподвесных оболочек из МК в накопитель. Данная процедура занимает не более 3 мин.

3. Выход на начальные условия формирования (исходная температура мишени, градиент температуры по каналу формирования, разрежение в канале). Данная процедура занимает не более 1.5 мин.

4. Перемещение оболочки из накопителя к входу в КФ с помощью дозатора. Гравитационная инжекция оболочки в канал формирования (КФ) и движение оболочки по КФ с после-



Рис. 12. Принципиальная схема модуля со спиральным каналом формирования

дующей инжекцией готовой криогенной мишени в тест камеру. Время пребывания оболочки в КФ может составлять от долей секунды до 15 сек (данные для серии КФ, показанных на Рис. 4, а-е).

В зависимости от геометрии КФ, оболочка, в процессе своего движения, либо непрерывно нахолится в контакте со стенками КФ (спиральный канал; Рис.4, а, б, в и е), либо испытывает множественные соударения с охлажденными стенками канала (узкий цилиндрический канал; Рис.4, д). Газ вымораживается на внутренней поверхности оболочки в результате теплоотвода через область ее контакта с охлажденными стенками канала. На выходе из канала оболочка инжектируется в оптическую тестовую камеру и падает на ее дно (Рис.13,а), либо на держатель миниатюрного устройства позиционирования (Рис.13,б). Эксперименты показали, что время пребывания оболочки внутри канала определяется длиной и формой канала, наличием внешних вибраций, а также давлением теплообменного гелия внутри КФ (см. Таблицу 3).



Рис.13. Инжекция криогенных мишеней в тестовую камеру (a) и инжекция мишени на держатель устройства позиционирования (б1-б3); T = 5K. 1 – выходное сопло канала формирования, 2 – держатель устройства позиционирования, 3 – ограничительное кольцо, 4 – инжектированная мишень

При работе со стеклянными оболочками, вместо цилиндрического МК применяется контейнер барабанного типа, схема которого показана на Рис.6. После завершения процесса заполнения газом, стеклянные оболочки

Таблица 3. Экспериментально	измеренное время пребывания
ทกงบพคทษกบั กกกงกนหบ คนพ	ти канала формирования

полимернои оболочки внутри канала формирования			
тип канала формирования	уровень разрежения внутри канала		вынужденная вибрация сте-
	0.5 атм Не 0.1 мТор		нок канала
J	5-8 сек	<u><</u> 1 сек	есть
цилиндрическии	8-12 сек	<u><</u> 4 сек	нет
	не изучено	5-6 сек	есть
винтовой	_/_	10-15 сек	нет

изымаются из камеры заполнения и, вручную, размещаются в гнездах МК. Работа осуществ-





ляется при н.у. (20⁰C, 760 мм рт ст). Далее, МК укрепляется в верхней части вставки в МФ. При вращении барабана, оболочки, одна за другой, под действием сил гравитации поступают в КФ с охлажденными стенками. Порядок получения криогенного слоя внутри стеклянной

оболочки осуществляется так же, как и в случае полимерных оболочек.

Характерные параметры криогенного эксперимента в координатах «температура – время» показаны на Рис.14.

Таким образом, общее время подготовки массива оболочек к формированию внутри них криогенного слоя составляет от 5 мин (работа со стеклянными оболочками) до ~ 35 мин (работа с полимерными оболочками), а сам процесс формирования занимает не более 15 сек (для одной оболочки).

При соответствующем изменении температуры дна и стенок тестовой камеры (ТК), температура криогенной мишени, находящейся внутри ТК, может изменяться в пределах от 4.2 К до 40 К по механизму контактной теплопроводности. Темп охлаждения оболочки при этом может варьироваться в пределах от 10⁻



Рис.15. Размещение оболочки и датчика температуры в оптической тестовой камере.

³ К/сек до 10 К/сек. На Рис.15 показано размещение датчика температуры в дне оптической тестовой камеры. Размер датчика (~0,5 мм³) сопоставим с размером оболочки.

5.2. Определение надежности температурных измерений

В серии экспериментов была исследована корреляция между показаниями температурного датчика, укрепленного в дне тестовой камеры, и реальной температурой криогенного слоя в оболочке. С этой целью были изучены твердые криогенные слои, сформированные с помощью материалов с известными теплофизическими характеристиками. Эти материалы включали H₂ (при 99,98 % протия), D₂ (при 99,8 % дейтерия) и эквимолярную смесь H₂+D₂. Корреляция температуры слоя внутри оболочки с показаниями датчика была исследована для двух модификаций камеры: с горизонтальным (камера №1) и вертикальным (камера №2) накоплением оболочек. Эксперимент проводился по следующей схеме:

- Стенка тестовой камеры охлаждалась до 5 К и внутри камеры достигалось требуемое разрежение;

- Оболочка с исследуемым криогенным слоем инжектировалась из КФ в камеру;

- Дно тестовой камеры (вместе с лежащей на нем оболочкой) нагревалось со скоростью 1,0±0,3 К/мин (~0.017 К/сек), при этом осуществлялась видеозапись эволюции криогенного слоя;

- Показания датчика температуры регистрировались в процессе нагрева криогенного слоя до начала его плавления и в процессе плавления слоя вплоть до окончания процесса.

При таких условиях, внутри оболочек, находящихся в камере №1, был сформирован твердый раствор смеси H₂+D₂ (давление в тестовой камере 1 мТор). Показания датчика начальной температуры плавления исследуемого криогенного слоя составили 16.3 ± 0.1 К. Процесс плавления был завершен при 16.8 ± 0.1 К (см. Рис. 16). Согласно диа-

грамме состояния [4,6], начальная и конечная температура плавления эквимолярной смеси H₂+D₂ должна составлять 15,79 К и 16,37±0,05К, соответственно. Следовательно, отклонение в показаниях температурного датчика от реальной температуры криогенного слоя не превысило 0,6 К.

Исследования на камере №2 (вертикальное накопление оболочек) показали, что отклонение в показаниях температурного датчика от реальной температуры криогенного слоя может достигать 3 К для оболочек, наиболее удаленных от дна камеры.

Эксперименты с криогенными слоями H₂ и D₂, сформированными внутри оболочек, показали, что слой плавится при



Рис.16. Плавление твердого раствора из эквимолярной смеси H₂+D₂ внутри оболочки из полистирола/ Камера с горизонтальным накоплением оболочек. Диаметр оболочки 950 мкм; (а) начало процесса плавления, T=16.3 K; (б) в процессе плавления T=16.6 K; (в) завершение процесса плавления при T=16.8 К

температурах 13,9±0,1 К (H₂) и при 18,7±0,1 К (D₂), которые находятся непосредственно вблизи тройных точек этих веществ [5]. Эксперименты проводились при давлении теплообменного гелия в тестовой камере, равном 15 Тор. Эти результаты совпадают для обеих модификаций тестовой камеры

Таким образом, точность показаний температурного датчика относительно реальной температуры криогенного слоя в камере №1 составила:

- при давлении газообразного гелия в камере P = 1 мТор : ± 0,6 К (камера №1) и 3 К (максимальное отклонение; камера №2)

- при давлении газообразного гелия в камере P=15 Top: ± 0.1 К (камеры №1 и №2)

Заключение

Итак, экспериментальный FST-комплекс, созданный в ФИАН, позволяет варьировать ключевые параметры эксперимента в широких пределах, что дает возможность изменять микроструктуру формируемого внутри оболочки криогенного слоя, а также исследовать его устойчивость по отношению к тепловым и механическим нагрузкам. Рабочие параметры комплекса следующие:

•	плотность газа внутри оболочки (нормировано к $\rho_{\kappa p}$) :	0.044 ÷1.49
•	давление заполнения при 300 К:	1÷1000 атм
-	давление т/о гелия в модуле формирования:	1 атм ÷ 10 ⁻⁴ тор
-	добавки (изотопы водорода или неон):	0.2÷20% (объ.)
-	темп охлаждения мишени, К/сек:	$\sim 10^{-3} \div 2 \cdot 10^{3}$
-	температура мишени:	4.2 ÷ 40 K
-	частота внешних механических воздействий:	0.3 Гц ÷ 3 МГц
•	система оптического наблюдения	
	- пространственное разрешение	от 1 мкм до 2.5 мкм
	- временное разрешение	40 мсек

Результаты исследований, проведенных с помощью созданного экспериментального комплекса, представлены в Главах 1 и 2 настоящей публикации.

60

Литература

- 1. М.П.Малков, и др. *Справочник по физико-техническим основам криогеники*. под ред М.П.Малкова. М. Энергия, 1973, 392с.
- 2. Б.И.Веркин, и др. *Свойства конденсированных фаз водорода и кислорода*. Справочник. Киев, «Наукова Думка», 1984, 240 с.
- 3. Г.Н.Щербаков. *Рентгеновские исследования твердого нормального дейтерия*. Физика Низких Температур **17**, №2, 139, 1991
- 4. P.C.Souers. Hydrogen properties for fusion energy. Univ.California Press, Ltd., 1985, 176p.
- 5. H.M.Roder, et al. Survey of the properties of the hydrogen isotopes below their critical temperature. NBS Technical Note, Monograph 74, 1965
- 6. Н.Г.Березняк, и др. Условия равновесия фаз системы водород-дейтерий в области температур 14-20 К. Украинский Физический Журнал 19, №3, стр. 472-481, 1974
- 7. И.В.Александрова, и др. *Криогенные мишени для реактора. Часть І. Диффузионное за*полнение топливом сферических оболочек. Препринт ФИАН №4, Москва- 2012 г., 134 стр.
- 8. А. Фаркас. *Ортоводород, параводород и тяжелый водород*. пер.с англ., Главная редакция химической литературы, М.: ОНТИ, 1936, 244 с.
- 9. E.R.Koresheva, et al. *Creation of a diagnostic complex for the characterization of cryogenic laser-fusion targets by the method of tomography with probing irradiation in the visible spectrum.* J.Russian Laser Research, **28** (2), 163, 2007
- 10. И.В.Александрова, и др. *Криогенные мишени для реактора*. Часть II. Характеризация криогенных мишеней. Препринт ФИАН №11, Москва-2013 г., 154 стр.



Рабочая группа проекта МНТЦ №512 на запуске системы заполнения: О.Н.Досчатова, Г.Д.Баранов, Е.Р.Корешева, Е.В.Антропова, В.И.Листратов И.В.Александрова, Т.П.Тимашева, Г.С.Усачев, И.Д.Тимофеев, И.Е.Осипов

Глава 2. FST-формирование криогенного слоя топлива в движущейся бесподвесной оболочке: теория, эксперимент, конструирование

В настоящее время быстрыми темпами развиваются те области исследования, которые связаны с разработкой эффективных методов формирования твердого слоя топлива внутри полых оболочечных конструкций (например, внутри полимерных оболочек различной толщины и конфигурации). Еще раз подчеркнем, что получаемые криогенные мишени должны быть бесподвесными (т.е., свободными, незакрепленными на каком-либо подвесе). Это является принципиальным условием, которое позволяет осуществить частотное формирование мишени и ее доставку в фокус мощной лазерной установки или реактора.

Значительный прогресс в этом направлении достигнут в области создания технологии, основанной на методе FST (Free-Standing Targets), предложенном и развитом в группе Криогенных мишеней Физического института им. П.Н. Лебедева (ФИАН) [1-50]. Фундаментальным отличием метода FST от традиционного подхода является принцип работы с движущимися бесподвесными мишенями, который позволяет осуществлять формирование и инжекцию криогенных топливных мишеней в непрерывном режиме или с необходимой частотой (см. Таблицу 2.1). Поэтому именно метод FST является перспективным путем решения проблемы частотного формирования и инжекционного транспорта криогенных мишеней без разрушения, а также организации производственного процесса на будущих реакторах.

В течение последних 20 лет под руководством ФИАН в России на основе метода FST создана научная, инженерная и технологическая база для построения демонстрационной установки непрерывного формирования криогенных мишеней реакторного масштаба и их инжекционной доставки в камеру реактора ИТС с требуемой частотой. Основные блоки установки для производства криогенных мишеней методом FST представлены на Рис.2.1. Для реализации поточной линии мишень остается свободной на каждом шаге замкнутого производственного цикла, основные этапы которого "заполнение-формирование-доставка" [2,3,8,12,13,19,27,39,44-48]. Топливный слой в мишени должен находиться в ультраобладающим дисперсном состоянии, комплексом новых свойств: изотропность, термостойкость и высокая прочность (более детально см. Главу 1). Использование такого слоя позволяет минимизировать риск разрушения мишени под действием внешних тепловых и механических перегрузок, возникающих при ее доставке в лазерный фокус установки ИТС [1,8-10,20,21,33-36,49]. Условия облучения мишени и методы ее защиты от внешней среды должны быть согласованы [1-11,24,31-36,42,48-50].

В первой книге из серии "Криогенные мишени для реактора" обсуждается первый этап цикла FST: заполнение массива полимерных оболочек газообразным топливом до давления 1000 атм при 300 К для различных материалов и конструкций оболочки [46].

Наиболее важным аспектом исследований, обсуждаемых в данной работе, является изучение физических закономерностей, лежащих в основе процесса FST- формирования (второй этап) твердого топливного слоя внутри движущихся бесподвесных оболочек, а также разработка численной модели для их адекватного математического описания. При этом будут рассматриваться криогенные мишени любого уровня, включая мишени реакторного класса.

Таблица 2.1. Метод FST – идеальный инструмент для формирования сферически симметричных изотропных ультрадисперсных слоев криогенного топлива.

FST условия	Результат	Эффект
Высокие скорости	■ Изотропное ультрадисперсное топливо	 Распространение ударной волны через изо- тропный твердый слой
охлаждения (градусы Кельвина в секунду) 1÷50 K/c	 Минимальное время формирования слоя: менее 15 сек 	Минимизация запасов трития при производстве топливных мишеней
	 Стабилизация размера зерна 	 Требуемая шероховатость слоя
Высокоплавкие добавки		
к топливу	Рост механической и тепловой устой-	 Сохранение качества мишени в процессе ее
0.5%÷20%	чивости слоя, находящегося в изотроп-	доставки в фокус мощной лазерной установки
	ном ультрадисперсном состоянии	или реактора
Формирование слоя	 Сферически симметричный слой 	 Мишени требуемого качества
в движущихся оболочках	 Частотное формирование мишеней 	 Массовое производство и доступная цена





Рис. 2.1. Основные блоки установки для производства криогенных мишеней методом FST: (a) 1 – FST- модуль формирования криогенных топливных мишеней, 2 – набор саботов (см. также б), 3 – узел для формирования защитной крышки, 4 – вращающийся револьвер для сборки ансамбля "мишень + сабот + крышка" (см. также б), 5 – тестовая камера. Классическая криогенная мишень (мишень прямого сжатия), применяемая в экспериментах по ИТС, представляет собой систему вложенных шаровых слоев, простейший вариант которой – полимерная оболочка и криогенный слой топлива. Полимерная оболочка есть не что иное, как тонкостенная полая сфера, которая может иметь защитные покрытия или даже состоять из нескольких слоев [51]. Чтобы получить криогенный слой значительной толщины, полимерные оболочки предварительно заполняются до высокого внутреннего давления (~1000 атм при комнатной температуре) газообразным топливом из изотопов водорода включая радиоактивный тритий в составе эквимолярной DT смеси (50% молекул DT, 25% дейтерия и 25% трития).

Криогенные мишени прямого сжатия, образуют линейку, начало которой соответствует дизайну мишеней для установки OMEGA (см. Таблицу 2.2). Идея эксперимента с мишенями класса OMEGA заключается в том, чтобы создать "гидродинамический эквивалент" достаточно близкий к мишеням, предназначенным для демонстрации поджига на установке NIF (National Ignition Facility). Их геометрия определяется соотношением $R_{OMEGA} \approx 1/3 \cdot R_{NIF}$ (согласно соотношению: (энергия) ~ (радиус)³), а твердое топливо должно быть сформировано в виде сферически симметричного слоя с толщиной W = 100 мкм на внутренней поверхности тонкой полимерной оболочки диаметром $\emptyset ~ 1$ мм с толщиной стенки ΔR в диапазоне от 5 до 1 мкм.

Параметры	OMEGA	NIF
мишеней	E _l = 30 кДж	Е ₁ =1.5 МДж
R, мкм	460	1690
$\Delta \mathbf{R}$, мкм	3	3
W, мкм	100	340
$(\rho R)_{\text{peak}}, \text{ мг/см}^2$	~ 300	~ 1200
<t>_n, кэВ</t>	3.9	30
Y _n	1.8×10^{14}	2.5×10^{19}

Таблица 2.2. Варианты дизайна мишеней для лазерных установок OMEGA и NIF [52-58].

Частотная подача топлива является необходимым условием проведения современных экспериментов по ИТС и перехода к реакторным технологиям производства криогенных топливных мишеней. С этой целью в США введена в действие установка NIF, в Европе создается мощная лазерная установка HiPER (High Power laser Energy Research) [40, 59], во Франции – установка LMJ [60].

Дизайн базовой мишени для проекта HiPER находится еще на стадии концептуализации и окончательно не утвержден. Предварительно рассматривается базовая мишень класса HiPER "Baseline Target-2" (BT-2), представленная в двух модификациях:

► ВТ-2 – сферическая полимерная оболочка (Ø~2 мм, толщина 3 мкм) с намороженным на ее внутренней стороне топливным слоем (211 мкм),

▶ВТ-2а – аналогичная тонкая оболочка (Ø~2 мм, толщина 3 мкм) с прилегающим слоем "полимерная пена + DT" (70 мкм), за которым идет твердый слой из чистого DT топлива (120 мкм).

Следующий шаг – это будущие классические реакторные мишени с высоким энергетическим выходом (Classical High Gain Target (CHGT)). В настоящее время рассматривается несколько вариантов дизайна такой мишени. Мы остановимся на варианте CHGT-1[61], который представляет собой полимерную оболочку диаметром Ø = 4 мм и толщиной стенки $\Delta R = 45$ мкм. Толщина твердого слоя топлива составляет W = 200 мкм.

Производство мишеней реакторного класса требует развития таких методов формирования слоя, которые будут удовлетворять требованиям по физике сжатия мишеней, а именно: криогенный топливный слой должен быть изотропным, чтобы в процессе сжатия мишени были достигнуты требуемые плотности и температуры для осуществления реакций синтеза. Исследования в этом направлении ведутся сейчас, например, в России, Испании и СЩА [62-65] (см. Таблицу 2.3).

В работе [65] прямо подчеркивается: "... our results clearly show that **nano-crystalline NIF targets** would guarantee small fluctuations in the shock front, decreasing the probability for unwelcome instabilities". Однако, в общепринятом подходе (например, β-layering метод [52-58]) скорости охлаждения крайне малы (~ $3 \cdot 10^{-5}$ K/c), а время формирования слоя составляет более 5 часов, что приводит к получению твердых слоев типа "монокристалл", обладающих существенной анизотропией в скорости звука (нижняя граница ~ 20%) [66, 67].

Технологии	Технологии Оболочка мишени	
Основные материалы	Компактные полимеры Пористые полимеры Бериллий (Ве)	Твердые изотопы водорода и их смеси
Характерные свойства и особенности, влияющие на технологию	Существенная анизотропия в скорости звука для кристаллов Ве → 20% [64]	Существенная анизотропия в скорости звука → 20% [66,67]
Исследования по теме: требования на размер зерна	США [64]: Менее 10 мкм	Россия, Испания [62,63]: Менее 1 мкм
Предложения по реализации и методики формирования	Использовать дейтерид бериллия (Россия, ФИАН) [68]	Метод FST (Россия, ФИАН) [25,49]

Таблица 2.3. Требования на функциональные параметры материалов мишени: структура всех компонентов мишени должна быть изотропной.

На текущий момент именно метод FST обеспечивает формирование изотропных слоев криогенного топлива внутри движущихся сферических оболочек. Это достигается, прежде всего, за счет реализации экстремально высоких скоростей охлаждения (1÷50 K/c), что позволяет получить разупорядоченные структуры с большой плотностью дефектов, т.е. изотропную среду, или, так называемые, ультрадисперсные слои с мелко зернистой или нано кристаллической структурой. Стабилизация полученных структур достигается за счет введения в состав топлива легирующих добавок (см. Главу 1). Такие слои можно отнести к классу слоев, перспективных для производства криогенных мишеней требуемого качества и сохранения параметров мишени в процессе ее доставки в камеру реактора ИТС [35,36].

Завершая эту небольшую вводную часть, отметим, что метод FST применим не только для формирования сферических криогенных мишеней, но также и цилиндрических для проведения экспериментов на установке ЛАПЛАС [37,38].

§1. Разработка базовой модели FST - формирования

Мы начнем с рассмотрения мишеней миллиметрового диаметра, предназначенных для проведения экспериментов по сжатию на установке с энергией лазера $E_l = 30$ кДж (уровень энергии соответствует уровню установки класса OMEGA). При построении FST модели будем опираться на экспериментальные результаты, полученные в группе Криогенных мишеней ФИАН для диаметра оболочки ~ 1мм. При проведении расчетов использовались данные информационного анализа по свойствам топлива и других материалов, используемых в цикле производства криогенных мишеней по методу FST (см. Приложение 1).

Как показали эксперименты, проведенные в ФИАН (схема установки дана на Рис.2.2), время формирования мишеней с толстым слоем топлива внутри замкнутой полимерной оболочки ($\emptyset \sim 1$ мм) не превышает 8 сек для цилиндрического канала (толщина слоя 88 мкм) и 12 сек для спирального (толщина слоя 30 мкм). Анализ всей серии экспериментов позволяет заключить, что в первом приближении время формирования криогенного слоя $\tau_{form} \approx 10$ сек можно рассматривать в качестве реперной точки (см., например, работы [25,49]) при математическом моделировании метода FST.



Рис. 2.2. Метод FST обеспечивает быстрое формирование и симметризацию твердых ультрадисперсных слоев топлива. На рисунках: (а) схема FST- модуля; (б) мишень до начала FSTформирования слоя (топливо в состоянии "стекшая жидкость + пар"); (в) мишень после FSTформирования (симметричный твердый слой); (г) спиральный канал формирования (1); (д) спиральный канал формирования (1) в сборке с тестовой камерой (2).

Формирование твердого топливного слоя внутри массива движущихся оболочек по методу FST осуществляется при инжекционном транспорте бесподвесной мишени между основными функциональными элементами системы: мишенный контейнер – модуль формирования – тестовая камера (см. Рис. 2.2). Цикл формирования реализуется следующим образом. Находящиеся в контейнере оболочки с жидким (или газообразным) топливом инжектируются в канал формирования, который представляет собой специальную вставку в криостат в виде вакуумированной трубки с охлаждаемыми стенками. В канале мишени движутся в быстрой последовательности, одна за другой, что позволяет реализовать частотную инжекцию готовых криогенных мишеней в тестовую камеру.



Рис. 2.3. Схема и общий вид мишенного контейнера для диффузионного заполнения оболочек топливным газом и транспорта заполненных оболочек в модуль формирования.

Рис. 2.2 иллюстрирует работу модуля FST- формирования (МФ) и взаимное расположение основных функциональных узлов:

► Мишенный контейнер (МК) – промежуточный узел между системой заполнения оболочек топливным газом и МФ

МК (Рис.2.3а) предназначен для заполнения оболочек топливным газом и транспорта (Рис.2.3 б,в,г) заполненных оболочек под давлением (~ 1000 атм при комнатной температуре) от системы заполнения к МФ. МК также является неотъемлемой частью модуля формирования, в котором осуществляется разгерметизация МК при криогенных температурах (Рис. 2.2 и Рис.2.3а), а также инжекция оболочек с топливом в канал формирования.

▶ Канал формирования (КФ) криогенных мишеней методом FST

КФ (Рис.2.2а) и представляет собой специальную вставку в криостат, определенная часть которой находится в парах кипящего гелия (Не). Используя нагреватель, можно изменять температуру стенок тестовой камеры, присоединенной к КФ в нижней его части, в диапазоне от 4.2 К до 40 К. Среда, непосредственно окружающая мишень внутри канала, представляет собой вакуум (стандартные условия) или теплообменный гелий при давлениях в диапазоне от $3 \cdot 10^2$ Па до 10^{-3} Па (особые условия эксперимента). Для проведения экспериментов разрабатываются каналы формирования различного дизайна:

– цилиндрические (широкие и узкие при вертикальной или наклонной геометрии экс-перимента),

– спиральные (причем спираль может быть одиночной, двойной или даже в форме трилистника),

- комбинированные (могут состоять из нескольких спиралей, для каждой из которых существует свой набор параметров: угол захода спирали, ее шаг, высота и т.д.)

При движении мишени по КФ в результате ее контакта с холодной стенкой последнего происходит охлаждение мишени, и вымораживание топливной смеси на внутренней стенке полой сферической оболочки за счет процесса контактной теплопроводности.

► Оптическая тестовая камера (ТК) - промежуточный узел между КФ и системой инжекционной доставки



Рис 2.4. Инжекция мишеней из модуля формирования в тестовую камеру при *T* = 4.2*K*.

ТК фактически представляет собой накопитель мишеней (см. Рис.2.2 и 2.4), который используется для диагностики готовых мишеней в экспериментах по FST- формированию, а также служит промежуточным узлом в системе транспорта мишеней в инжектор.

Два основных принципа метода FST [16,17,22-25]:

■ Охлаждение топлива за счет контактной теплопроводности между движущейся оболочкой и стенкой канала формирования (см. Приложения 2 и 3).

■ *Динамическая симметризация жидкого топлива*, т.е. симметризация слоя, обусловленная свободным вращением мишени при ее движении вдоль канала формирования

Опыт работы с криогенными мишенями показал, что следующие факторы влияют на результаты формирования топливных слоев по методу FST:

► Скорость охлаждения мишени (1÷50 К/с)

Высокие скорости охлаждения позволяют быстро (менее, чем за 15 секунд) сформировать криогенный слой в ультрадисперсном состоянии.

► Состав топлива (наличие высокоплавких добавок в количестве 0.5% – 20%)

Наличие добавок обеспечивает стабилизацию размера зерна получаемой ультрадисперсной структуры (более детально см. Главу 1). Кроме того, добавки к топливу повышают механическую прочность и тепловую устойчивость получаемых криогенных слоев, что минимизирует риск потери качества слоя в процессе доставки мишени в камеру реактора ИТС. В случае DT топлива (эквимолярная композиция: 50% молекул DT, 25% D₂ и 25% T₂) тритий играет роль такой добавки по отношению к остальным компонентам смеси.

Начальная температура мишени T_{in} (см. Рис.2.5), которая определяет одну из ключевых величин – время существования жидкой фазы топлива в процессе охлаждения мишени τ_{liquid} . Это время должно быть достаточным для симметризации жидкого криогенного слоя при движении оболочки по каналу формирования.

Температурный профиль вдоль канала формирования, который при прочих равных условиях зависит от материала, из которого изготовлен канал

▶ Геометрия канала формирования: например, для варианта одиночной спирали (см. Рис. 2.2) определяющими являются угол захода, диаметр, высота и ширина спирали. Могут также использоваться и каналы формирования с переменными параметрами по высоте спирали (см. Приложение 6). В любом случае, именно эти величины будут определять время пребывания мишени в канале формирования, которое должно быть больше, чем время вымораживания криогенного слоя на внутренней поверхности движущейся оболочки.

Варьируя перечисленные параметры, можно оптимизировать метод FST для мишеней любого уровня, включая мишени реакторного масштаба.

Таким образом, цель применения FST-технологий заключается в демонстрации преимуществ использования незакрепленных оболочек при реализации основной производственной цепочки: (1) заполнение оболочек топливом \rightarrow (2) формирование слоя \rightarrow (3) доставка готовых криогенных мишеней. Стадия (1) детально рассмотрена в работах [12,13,45], а также в обзорной работе [46] "Диффузионное заполнение топливом сферических оболочек".

Моделирование второго этапа FST- цикла, т.е. непосредственно этапа формирования слоя при *охлаждении мишени за счет контактной теплопроводности* между движущейся оболочкой и стенкой канала формирования, является предметом настоящей работы.

1.1. Механизм отбора тепла из мишени

Механизм отбора тепла из мишени является ключевым моментом в образовании криогенного слоя (см. Рис.2.6). В условиях эксперимента остывание вещества в мишени и фазовые переходы в ней являются неизбежно трёхмерным процессом, поскольку, в принципе,

- не реализуется сферически симметричный отбор тепла с поверхности мишени;

- неустраним не радиальный градиент температуры;

- в гравитационном поле жидкая фаза успевает стечь на дно покоящейся мишени.

Время стекания для типичной мишени радиусом R = 0.5 мм составляет $\tau_{gravity} \approx (2R/g)^{1/2} \approx 10$ мсек (g - ускорение свободного падения), что заведомо меньше наблюдаемых времён формирования слоя $\tau_{form} \approx 10$ сек. Следовательно, корректное математическое описание процесса предполагает существенно неодномерную модель. При этом, однако, эффекты "неодномерности" играют лишь количественную роль и могут изменить времена формирования криогенного слоя τ_{form} лишь в разы, тогда как есть физически важный параметр, изменение которого приводит к «качественному» изменению τ_{form} – на порядки. Речь идёт о темпе отвода тепла с поверхности мишени, то есть, о внешнем граничном условии. Поэтому, оценивая роль механизма отбора тепла, в первом приближении можно ограничиться одномерной сферически симметричной моделью при нахождении τ_{form} .

Быстрый отбор тепла реализуется, когда вся мишень целиком погружена в теплообменное вещество (Рис.2.6а, т. н. fast isothermal freezing (FIF) метод). В эксперименте это обычно жидкий гелий (Не). При этом время остывания вещества мишени и образование в ней криогенного слоя контролируется собственными временами переноса тепла в мишени и в оболочке τ_{fuel} и τ_{shell} и составляет десятки миллисекунд (см. §1.3.1).

Медленный отбор тепла реализуется за счёт излучения с поверхности оболочки, когда вся мишень целиком окружена вакуумом и находится в свободном падении в цилиндрическом вакуумном канале, стенки которого охлаждаются снаружи жидким гелием (Рис.2.66, т. н. free fall target (FFT) метод). Это очень медленный процесс. Тепло внутри мишени успевает перераспределяться, а затем доставляется к внешней поверхности оболочки, откуда и излучается. Оценка $\tau_{form} \propto \sigma^{-1}$, где σ - излучательная способность «чёрного» тела.

Оценить, сколь медленно охлаждается мишень за счет теплового излучения, довольно легко. Поэтому мы приведем соответствующие выкладки, чтобы в терминах "температура - время" дать более наглядное представление о динамике такого процесса.

Рассмотрим задачу об охлаждении мишени, находящейся в свободном полете внутри цилиндрического вакуумного канала. Температура стенок канала вследствие их охлаждения жидким гелием постоянна и равна 4.2 К. Сделаем оценки для самых благоприятных условий отбора тепла, а именно:

- мишень представляет собой черное тело,

- перенос тепла излучением от стенок канала к поверхности мишени отсутствует,



Рис. 2.5. Исходное количество жидкой фазы зависит от выбора начальной температуры мишени T_{in}.



Рис. 2.6. Механизм отбора тепла из мишени. Обозначения: КФ – канал формирования, Не – жидкий гелий.



Рис. 2.7. Метод FFT: проброс мишени в цилиндрическом вакуумном канале, стенки которого охлаждаются жидким гелием (см. Рис. 2.6.б). Результат: инжекция горячей мишени с газообразным H_2 из канала в TK при T = 4.2 K (кадр 1). Через 40 мсек (кадр 2) конденсация H_2 образует жидкую каплю, падающую на дно оболочки (кадры 3,4,5). Кадр 6 \rightarrow жидкий H_2 растекается по оболочке за счет смачивания ее внутренней поверхности, а затем вымерзает. Таким образом, формирование твердой фазы происходит в TK за счет контактной теплопроводности, а не за счет излучения при свободном полете мишени внутри цилиндрического вакуумного канала.
– минимальная масса топлива (соответствует толщине криогенного слоя *W* ~ 30 мкм, минимальный топливный слой, представляющий экспериментальный интерес),

- при расчете были взяты минимальные значения теплоемкости оболочки и топлива.

В этом случае, время, требуемое для охлаждения мишени от температуры T_0 до температуры T_1 , можно оценить по формуле

$$\tau = \int_{T_1}^{T_0} \frac{m_{fuel} C_{fuel}(T) + m_{shell} C_{shell}(T)}{4\pi R^2 \sigma T^4} dT,$$

где m_{fuel} и m_{shell} соответственно масса топлива и оболочки; C_{fuel} и C_{shell} – теплоемкости топлива и оболочки; R – радиус оболочки; σ = const = 5.67 10⁻⁸ (Вт/м²К⁴). Определим время охлаждения мишени от начальной температуры T_0 на небольшую величину ΔT . Результат интегрирования дает

$$\tau = \gamma \left(\frac{1}{T_1^3} - \frac{1}{T_0^3} \right) \approx \frac{9\Delta T}{4\pi R^2 \sigma T_0^4} \left(m_{fuel} C_{fuel} + m_{shjell} C_{shell} \right), \ T_1 = T_0 - \Delta T$$

В Таблице 2.4 приведены характерные времена охлаждения τ миллиметровой мишени, заполненной дейтерием (толщина стенки оболочки $\Delta R = 10$ мкм, толщина топливного слоя W = 30 мкм) при различных значениях величин T_0 и ΔT . Напомним, что, температура, до которой необходимо охладить мишень, чтобы начал формироваться твердый топливный слой, равна температуре тройной точки для дейтерия $T_{tp} = 18.7$ К.

ΔT	$T_0 = 300 \text{K}$	$T_0 = 100 { m K}$	$T_0 = 40 \mathrm{K}$
0.1 K	0.1 сек	8 сек	3.5·10 ² сек
0.5 K	0.5 сек	40 сек	1.7·10 ³ сек
1.0 K	1.0 сек	81 сек	3.5·10 ³ сек

Таблица 2.4. Охлаждение мишени за счет излучения.

Таким образом, механизм переноса тепла излучением не может рассматриваться как основной при формировании топливного слоя, что соответствует результатам экспериментов, полученных в Криогенной группе (см. Рис. 2.7).

«Умеренный» отбор тепла реализуется, когда лишь часть поверхности мишени, причём ее малая часть, находится в тепловом контакте с окружающей средой (см. Рис. 2.6в, т. н. free standing target (FST) метод). Этот контакт происходит в месте прижимания оболочки мишени к стенке канала формирования. Прижимаясь, оболочка мишени слегка деформируется, и образуется контактное пятно. Площадь пятна очень мала, менее процента от всей площади оболочки, но этого вполне достаточно, чтобы отобрать тепло и успеть сформировать криогенный слой всего за несколько секунд. Эта оценка, полученная в рамках нашей модели [17,22,23], находится в хорошем согласии с экспериментально наблюдаемым временем пребывания мишени в канале формирования $\tau_{res} \sim 10$ сек. Поэтому естественно считать, что именно такой механизм отбора тепла реализуется на практике.

1.2. Решение задачи Стефана для случая вымораживания топливного слоя внутри полой сферической оболочки при вариации способа отвода тепла из мишени

Перенос тепла в одномерной сферически симметричной модели описывается в виде уравнений теплопроводности

$$\rho_{\ell}C_{\ell}\frac{\partial T_{\ell}}{\partial t} = \frac{1}{r^2}\frac{\partial}{\partial r}\left(r^2k_{\ell}\frac{\partial T_{\ell}}{\partial r}\right)$$
(2.1)

для каждой из трёх фаз вещества мишени: газообразная ($\ell = gas$), жидкая ($\ell = liquid$), и твёрдая ($\ell = solid$) и для вещества оболочки ($\ell = sh$), причём температура $T_{\ell}(r)$ непрерывна на границах раздела фаз и на внутренней поверхности оболочки. Здесь ρ_{ℓ} -плотность, C_{ℓ} - теплоёмкость, k_{ℓ} – коэффициент теплопроводности, r – радиальная координата, t – время.

Считается, что в мишени могут сосуществовать все три фазы вещества, реальное же число фаз обусловлено историей процесса охлаждения мишени. Функции $C_{\ell}(T), k_{\ell}(T), \rho_{sh}$ полагаются известными и определяются путём интерполяции существующих экспериментальных данных. Плотности жидкой и твёрдой фаз как функции температуры, $\rho_{liquid}(T)$ и $\rho_{solid}(T)$, известны из литературы (см. Приложение 1).



Рис. 2.8. Фазовая диаграмма водорода в координатах "давление – удельный объем"

Формирование мишени представляет собой изохорический процесс, происходящий внутри полой оболочки при ее охлаждении в канале формирования. Фазовые превращения при этом контролируются температурой и фазовой диаграммой вещества мишени на плоскости P - V (Рис.2.8, диаграмма полагается известной, см. Приложение 1). Состояние топлива в мишени на плоскости P - V представляется отрезком прямой (изохора формирования, обозначенная на Рис. 2.8 цифрами 1 \rightarrow 2 \rightarrow 3), опускающейся сверху вниз (мишень остывает). Переход газ \rightarrow жидкость начинается, когда этот отрезок пересекает линию насыщения на фазовой диаграмме в точке T_s (температура начала процесса разделения газ \rightarrow жидкость). При дальнейшем охлаждении мишени до температуры тройной точки T_{tp} (для водорода $T_{tp} = 13.96$ K) происходит вымораживание криогенного слоя внутри замкнутой оболочки, т.е. осуществляется изохорический переход жидкость \rightarrow твёрдая фаза топлива.

При охлаждении мишени на этапе $1 \rightarrow 2$ давление газа в оболочке падает, что описывается уравнением *Ван-дер-Ваальса*, которое устанавливает связь между давлением газа в оболочке *P*, его температурой *T* и плотностью ρ_{gas} :

$$P = \frac{R_{g}T}{\frac{\mu}{\rho} - b} - \frac{a\rho_{gas}^{2}}{\mu^{2}}$$
(2.2)

где R_g – индивидуальная газовая постоянная, зависящая от плотности и температуры, μ – удельный молекулярный вес, T – абсолютная температура, a и b параметры, зависящие от температуры.

Масса газа в мишени будет меняться во времени за счёт фазового перехода

$$m_{gas}(t) \equiv \int_{0}^{r_{gas}} \rho_{gas}(T) \cdot 4\pi r^2 dr$$
, (2.3)

где $r_{gl}(t)$ - положение границы раздела фаз газ—жидкость.

Массы жидкой и твёрдой фаз,

$$m_{liquid}(t) \equiv \int_{r_{gl}}^{r_{ls}} \rho_{liquid}(T) \cdot 4\pi r^{2} dr \qquad (2.4)$$
$$m_{solid}(t) \equiv \int_{r_{lg}}^{R} \rho_{solid}(T) \cdot 4\pi r^{2} dr , \qquad (2.5)$$

будучи известны, служат для определения положения границ раздела фаз газ—жидкость, $r = r_{el}(t)$, и жидкость—твёрдое тело, $r = r_{ls}(t)$.

Сами же массы фаз $m_{gas}(t), m_{liquid}(t), m_{solid}(t)$ находятся из условий фазовых превращений на границах раздела фаз (задача Стефана):

$$\lambda_{gl}(T_{gl}) \cdot \frac{dm_{gas}}{dt} = -4\pi r_{gl}^2 \left(\left[k_{gas} \frac{\partial T}{\partial r} \right]_{r=r_{gl}} - \left[k_{liquid} \frac{\partial T}{\partial r} \right]_{r=r_{gl}} \right), \quad (2.6)$$
$$\lambda_{ls}(T_{ls}) \cdot \frac{dm_{solid}}{dt} = 4\pi r_{ls}^2 \left(\left[k_{solid} \frac{\partial T}{\partial r} \right]_{r=r_{ls}} - \left[k_{liquid} \frac{\partial T}{\partial r} \right]_{r=r_{ls}} \right). \quad (2.7)$$

Здесь $\lambda_{gl}(T)$ и $\lambda_{ls}(T)$ – теплота фазовых переходов соответственно газ—жидкость и жидкость—твёрдое тело. Величины $T_{gl} \equiv T|_{r=r_{gl}}$ и $T_{ls} \equiv T|_{r=r_{ls}}$ – есть температуры на границах раздела фаз.

Уравнения (2.6) и (2.7) дополняются также законом сохранения вещества в мишени:

$$\frac{d}{dt}\left(m_{gas} + m_{liquid} + m_{solid}\right) = 0.$$
 (2.8)

На внутренней поверхности оболочки при r = R, наряду с непрерывностью температуры, следует потребовать и непрерывность потока тепла,

$$\left[k_{\ell} \frac{\partial T_{\ell}}{\partial r}\right]_{r=R} = \left[k_{sh} \frac{\partial T_{sh}}{\partial r}\right]_{r=R}, \qquad (2.9)$$

поскольку здесь тепло никуда не тратится. Индекс ℓ в (3.9) соответствует той фазе топливного вещества мишени, которая реализуется на внутренней поверхности оболочки.

Граничное условие в центре сферической мишени очевидно. Это отсутствие в указанной зоне потока тепла:

$$\left[\frac{\partial T}{\partial r}\right]_{r=0} = 0.$$
 (2.10)

Граничное же условие на внешней поверхности оболочки при $r = R + \delta \cdot R$ (здесь δ – аспектное отношение оболочки: $\delta = \Delta R / R$, где ΔR – толщина оболочки) может изменяться в зависимости от рассматриваемой задачи. Собственно говоря, именно это условие и описывает способ отбора тепла из мишени. Если мишень погружена в термостат с заданным изменением температуры во времени $T_{external}(t)$, то

$$T_{sh}(r = (1 + \delta)R) = T_{externfl}(t).$$
(2.11)

Если мишень окружена вакуумом и охлаждается лишь за счёт излучения с её поверхности (σ – излучательная способность тела), то

$$\left[4\pi r^2 k_{sh} \frac{\partial T_{sh}}{\partial r} + \sigma(T) \cdot T_{sh}^4\right]_{r=(1+\delta)R} = 0.$$
 (2.12)

Если на внешней поверхности оболочки задан поток тепла q, то

$$\left[4\pi r^2 k_{sh} \frac{\partial T_{sh}}{\partial r}\right]_{r=(1+\delta)R} = -q. \qquad (2.13)$$

Такое граничное условие можно использовать для оценки времени формирования слоя при отборе тепла через пятно контакта. При этом считается, что размер пятна χ прямо пропорционален величине q. Учёт теплоотдачи в пятне контакта приводит и к другому модельному граничному условию

$$[T_{sh}]_{r=(1+\delta)R} = (1-\chi)[T_{sh}]_{r=R} + \chi \cdot T_{external}. \qquad (2.14)$$

Уравнения (2.1) – (2.9) с граничными условиями (2.10) – (2.14) представляют собой задачу Стефана для случая вымораживания топливного слоя внутри полой сферической оболочки, причем способ отвода тепла из мишени может варьироваться в соответствии с условиями эксперимента за счет изменения внешнего граничного условия [17,22,23].

Как отмечалось выше, решения описанной задачи можно ранжировать по характерным временам главных процессов – теплопереноса внутри мишени, τ_{fuel} , τ_{shell} , и темпа отвода тепла с поверхности мишени, $\tau_{surface}$.

Если выполняется условие $\tau_{surface} \leq \tau_{gas}, \tau_{shell}$, то можно говорить о «быстром» отборе тепла из мишени, в противном случае при $\tau_{surface} >> \tau_{gas}, \tau_{shell}$ о «медленном» отборе тепла. Отметим, что численное решение задачи необходимо и оправдано при «быстром» отборе тепла.

При «медленном» отборе тепла эффекты профиля температуры в мишени малосущественны, так как температура успевает «следить» за этим отбором. Поэтому в этом случае можно и нужно пользоваться аналитическими оценками, нечувствительными к профилям температуры.

1.3. Анализ полученных результатов

Для анализа полученных результатов удобно использовать следующие параметры:

– время спада температуры на внешней поверхности мишени $\tau_{surface}$: этот параметр свободен и зависит лишь от условий эксперимента, т.е., от того, как быстро охлаждается поверхность мишени;

– времена $\tau_1, \tau_2, \tau_3, \tau_4$ суть времена в миллисекундах начала и конца ожижения и отвердения топлива, а именно:

 τ_1 - момент времени, когда начинается ожижение,

 τ_2 - момент времени, когда весь газ ожижен,

 au_3 - момент времени, когда начинается затвердение,

 τ_4 - момент времени, когда всё превратилось в лёд.

Необходимые для расчета данные по механическим и теплофизическим параметрам материалов, входящих в состав мишеней, представлены в Приложении 1. Можно также обратиться к работам, которые с нашей точки зрения, наиболее полно отражают ситуацию по свойствам материалов, используемых при дизайне мишеней [58,59,69-77].

1.3.1. Быстрый отбор тепла. Метод FIF.

Ниже мы обсудим результаты для случая быстрого отбора тепла, когда вся мишень целиком погружена в жидкий гелий. Если не оговорено иначе, то исходные данные для расчета следующие:

• Геометрия оболочки одна и та же: внешний радиус мишени R = 500 мкм, толщина стенки оболочки ΔR варьируется в пределах от 1 до 15 мкм.

■ Начальная температура мишени $T_{in} = 300$ К. Температура внешней поверхности оболочки спадает с характерным временем $\tau_{surface}$ в диапазоне от 1 до 10 мсек.

■ Оболочка сделана или из стекла, или из полистирола; заполняется либо водородом *H*₂ (*ρ*_{*fill*} = 25 мг/см³), либо дейтерием *D*₂ (*ρ*_{*fill*} = 50 мг/см³).

Данные для оболочки из стекла представлены в Таблице 2.5.

Таблица 2.5. Результаты расчёта для мишени с оболочкой из стекла (пирекс).

 $[\]tau_{surface} = 1$ мсек, $\Delta R = 10$ мкм

Газ	$ au_1$	$ au_2$	$ au_3$	$ au_4$
H_2	4.3	8.53	8.53	13.7
D ₂	5.74	7.99	13.29	16.3

При анализе результатов будем следить за характерным временем существования жидкой фазы $\tau_3 - \tau_1 = \tau_{liquid}$. Отметим, что в Таблице 2.5 для дейтерия величина τ_{liquid} уже составляет ~ 10 мсек.

Данные для оболочки из полистирола представлены в Таблице 2.6. Теплопроводность полистирола значительно меньше, чем у стекла (см. Приложение 1), и мы вправе ожидать увеличения характерных времён. Это подтверждается и на счёте. Из Таблицы 2.6 видно, что теперь величина $\tau_2 - \tau_1$ существенно превышает 10 мсек как для водорода, так и для дейтерия.

Таблица 2.6. Результаты расчёта для мишени с оболочкой из полистирола.

$\tau_{surface} = 1$ мсек, $\Delta R = 10$ мкм						
Газ	$ au_1$	$ au_2$				
TT	05 (2	1(0.)				

H_2	95.62	168.2
\mathbf{D}_2	124.57	227.6

Очевидно, что увеличение толщины оболочки или величины $\tau_{surface}$ приведет лишь к увеличению времени существования жидкой фазы. Соответствующие результаты отражены в Таблицах 2.7 и 2.8.

При анализе результатов расчета обращает внимание на себя тот факт, что характерное время существования жидкой фазы (как для водорода, так и для дейтерия) в интересующем нас случае оболочки из полистирола более 10 мсек, а для толстых оболочек превышает сотню миллисекунд. За это время жидкость в поле обычной силы тяжести неминуемо стечет на дно оболочки мишени. Напомним, что время стекания для типичной мишени радиусом R = 0.5 мм составляет $\tau_{gravity} \approx 10$ мсек (см. §1.1)

Таблица 2.7. Результаты расчёта для мишени с оболочкой из стекла (пирекс) при вариации толщины оболочки и времени спада температуры на ее внешней поверхности.

 H_2 , $\Delta R = 15$ мкм

$ au_{\it surface}$	$ au_1$	$ au_2$	$ au_3$	$ au_4$
1.0	5.83	10.74	15.59	18.71
10.0	25.93	35.81	42.23	47.07

 H_2 , $\Delta R = 15$ мкм

$ au_{\it surface}$	$ au_1$	$ au_2$	$ au_3$	$ au_4$
0.5	8.4	15.93	23.89	28.04
1.0	8.84	16.37	24.32	28.48
5.0	16.06	25.49	33.25	37.49
10.0	27.51	39.5	48.7	53.76

Таблица 2.8. Результаты расчёта для мишени с оболочкой из полистирола при вариации толщины оболочки.

 $H_2, \tau_{surface} = 1$ мсек ΔR (мкм) au_1 au_2 τ_3 7.99 30.13 1.0 16.90 38.04 24.00 44.20 54.89 1.5 11.39 2.0 15.04 31.17 58.47 71.88 23.01 45.89 87.86 106.57 3.0 5.0 41.67 77.87 150.22 179.19 95.62 168.2 327.86 382.47 10.0 15.0 189.31 293.89 538.04 617.96

Для иллюстрации на Рис. 2.9 представлены фотографии мишеней, в которых жидкая фаза водородного топлива стекла на дно оболочки.



Рис. 2.9. Полимерные оболочки с жидким водородом.

 au_4

Условия эксперимента:

- использовались оболочки из полистирола диаметром $2R \sim 1$ мм,

- толщина стенки оболочки $\Delta R = 10$ мкм,

- диффузионное заполнение газообразным водородом осуществлялось при комнатной температуре $T = 300 \, K$ до давления $P_f = 445 \, amm.$

Таким образом, невозможно сформировать равнотолщинный криогенный слой в неподвижной мишени даже в случае быстрого отбора тепла (метод FIF).

Далее мы покажем, что использование движущейся мишени в цилиндрическом или спиральном каналах формирования (метод FST) позволяет эффективно противодействовать стеканию топлива, давая возможность топливному слою равномерно затвердеть.

1.3.2. Умеренный отбор тепла. Метод FST.

Как мы уже отмечали, умеренный отбор тепла реализуется, когда лишь часть поверхности мишени при ее движении в канале формирования находится в тепловом контакте с окружающей средой. Прижимаясь к холодной стенке канала (Рис.2.6в), оболочка слегка деформируется, и образуется контактное пятно S_{ca} , которое будем характеризовать следующим соотношением: $S_{ca} = \chi \cdot S_{sh}$, где S_{sh} – площадь поверхности оболочки, χ – параметр задачи, который учитывает не только геометрические, но и тепловые особенности взаимодействия системы "стенка канала – оболочка мишени". На практике, в условиях FST эксперимента, образуется эффективное пятно контакта χ_{eff} = геометрическое (χ_g) + тепловое (χ_t). При качении мишени по криволинейному каналу происходит увеличение геометрического пятна контакта за счет кривизны спиральной трубки. Увеличение пятна контакта связано еще и с тепловыми эффектами, когда пятно контакта как бы "расплывается", так как передача тепла идет не только по радиальному направлению, но и в стороны (тангенциальная составляющая). Кроме того, части поверхности оболочки, покинувшие область контакта, остывают не сразу.

Точное решение задачи о геометрическом пятне контакта представляет собой самостоятельную проблему именно для интересующего нас случая массивной упругой сферической оболочки, когда ее толщина значительно меняется в зависимости от дизайна мишени. Изменение формы оболочки имеет сложный характер, так как деформируется не только ее нижняя часть в области пятна контакта (сжатие и изгиб), но и оболочка под действием собственного веса меняет форму, что приводит к увеличению радиуса кривизны мишени и, соответственно, к увеличению контактной области. Поэтому в данной работе мы ограничимся лишь проведением ряда оценок, показывающих, что пятна контакта с размером порядка $\chi_g \geq 10^{-4}$ (см. Приложение 2) вполне могут образовываться в условиях FST- эксперимента.

Расчет теплового пятна контакта представлен в Приложении 3. Получена оценка площади такого пятна при решении задачи о тангенциальном распространении тепла через распределенные источники, которые соответствуют радиальному тепловому потоку. Показано, что в условиях FST эксперимента образуются эффективные пятна контакта (геометрическое + тепловое) с размером $\chi_{eff} \ge 10^{-3}$ (Таблица 2.9), что на порядок больше χ_g . Покажем, что такая величина χ_{eff} является достаточной, чтобы сформировать криогенный слой за время, не превышающее 10 секунд. Для этого проанализируем эксперименты по FST- формированию слоя внутри цилиндрического и спирального каналов формирования. Результаты расчетов и соответствующие экспериментальные данные представлены в Таблице 2.9, в которой приняты следующие обозначения: T_{in} - начальная температура мишени перед ее инжекцией в канал формирования, W – толщина криогенного слоя топлива, τ_{res} – время пребывания мишени в канале формирования (эксперимент), τ_{iquid} - характерное время существования жидкой фазы в процессе охлаждения мишени (расчет), τ_{form} – полное время формирования слоя (расчет). Подчеркнем, что всегда должно выполняться очевидное условие: $\tau_{form} \leq \tau_{res}$. Время формирования мишеней рассчитывалось согласно числительному коду "**Rapid FST**", разработанному в группе Криогенных мишеней Физического института им. П.Н. Лебедева [17,22,23].

ųusi	цилипорического и спирилопосо кипилов формировиния								
№	Газ	2 <i>R</i> (мкм)	Тип геометрии канала	T _{in} (K)	<i>W</i> (мкм)	$ig\langle \chi_{e\!f\!f}ig angle$	τ _{liquid} (сек)	τ _{form} (сек)	$ au_{res}$ (сек)
1	H ₂	983	цилиндр	21	88	$2.4 \cdot 10^{-3}$	2.97	7.22	8
2	H ₂	983	цилиндр	15	88	$2.4 \cdot 10^{-3}$	0.97	5.13	8
3	D ₂	980	спираль	26	30	$2.59 \cdot 10^{-3}$	1.95	3.74	12

Таблице 2.9. Сравнение экспериментальных и теоретических результатов для *иилиндрического и спирального каналов формирования

*/ Для цилиндрического канала было проведено две серии экспериментов:

№1 \rightarrow T_{in} = 21К и №2 \rightarrow T_{in} = 15К для исследования вопросов симметризации слоя.

Параметры оболочек и топливного слоя для этих экспериментов представлены соответственно в Таблицах 2.10 и 2.11. В Таблице 2.10 приняты следующие обозначения: R – внешний радиус оболочки, $R_0 = R - \Delta R$ – внутренний радиус оболочки, R_{ca} – радиус геометрического пятна контакта. Безразмерный параметр χ_g определяется следующим соотношением (см. Приложение 2):

$$\chi_g = \frac{1}{2} \left(3G / \pi \delta E R^2 \right)^{1/2}, \quad \delta = \Delta R / R,$$

где G – нормальная реакция опоры при качении оболочки по каналу формирования, E – модуль Юнга материала оболочки, δ – обратное аспектное отношение оболочки.

N⁰	R	ΔR	R_0	R_{ca}	χ_{g}		
1, 2	491.5	15	476.5	11.76	1.4310 ⁻⁴		
3	490.0	15	475.0	11.39	1.3510 ⁻⁴		
$R, \Delta R, R_0, R_{ca} \rightarrow$ даны в микронах							

Таблица 2.10. Параметры оболочки.

В Таблице 2.11 для топливного слоя приняты следующие обозначения: V_{cl} – объем твердого топлива (мм³); m_{cl} – масса твердого топлива (мкг); V_v – объем пара в полости мишени (мм³); m_v – масса топливного пара (мкг); ρ_f – плотность газообразного топлива в мишени при 300 К (мг/см³); P_f – давление заполнения мишени газообразным водородом при комнатной температуре 300 К (атм); M_f – полная масса топлива (мкг).

Таблица 2.11. Параметры топливного слоя.

N⁰	Газ	V _{cl}	m _{cl}	V_{v}	m_{v}	$ ho_f$	P_f	M_{f}
1, 2	H ₂	0.21	17.99	0.25	0.03	39.78	765.19	18.02
3	D ₂	0.08	15.69	0.37	0.17	35.33	244.05	15.86

Анализируя данные Таблицы 2.9, прежде всего отметим, что теоретические результаты, полученные в рамках созданной модели, находится в хорошем согласии с экспериментально наблюдаемым временем пребывания мишени в канале формирования τ_{res} . Два последних столбца таблицы с очевидностью демонстрируют возможности метода FST за короткое время сформировать внутри полимерной оболочки криогенный слой значительной толщины, причем расчетное время формирования слоя удовлетворяет условию $\tau_{form} \leq \tau_{res}$.

Теперь перейдем к рассмотрению вопроса о симметризации криогенного слоя, для чего детально опишем схему постановки экспериментов, представленных в Таблице 2.9.



Рис. 2.10. Метод FST обеспечивает быстрое формирование и симметризацию конденсированных слоев топлива. На рисунке (а): мишень до начала формирования при $T_{in} = 21$ К. Диаметр оболочки $\emptyset = 986$ мкм. Начальное состояние водорода \rightarrow "жидкость + пар" ($T_{in} < T_{cp} = 33.19$ К) с максимальной асимметрией слоя NU = 100 %. На рисунке (б): мишень после формирования при T = 5.5 К.

Эксперимент №1. Начальная температура мишени перед ее инжекцией в канал формирования равна $T_{in} = 21$ К (температура начала вымораживания слоя для $H_2 \rightarrow T_{ip} = 13.96$ К). Согласно фазовой диаграмме (Рис. 2.8), топливо находится частично в жидком, и частично в газообразном состоянии, т. е. неоднородность слоя по толщине составляет 100% (конфигурация стекшей жидкости внутри оболочки \rightarrow "жидкость+пар", см. Рис. 2.10а). Характерное время существования жидкой фазы в процессе охлаждения мишени $\tau_{liquid} = 2.97$ сек (Таблица 2.9). Равномерный слой толщиной W = 88 мкм сформирован методом FST при температуре 5.5 К (Рис. 2.10б) за время $\tau_{form} = 7.22$ сек (Таблица 2.9). Эксперимент №2. При понижении T_{in} с 21 К (Рис. 2.11а) до 15 К (Рис. 2.11б) симметризующий эффект пропадает. В рамках нашей модели можно предложить следующее объяснение исчезновения симметризации слоя при понижении начальной температуры мишени практически до температуры тройной точки $T_{ip} = 13.96$ К (начало вымораживания для H_2).



Рис. 2.11. Влияние начальной температуры мишени на симметризацию слоя.

Твердый криогенный слой образуется внутри оболочки, непременно проходя через жидкую фазу. В §1.3.1 было показано, что даже в случае высоких скоростей охлаждения время существования жидкой фазы существенно превышает время гравитационного стекания $\tau_{gravity}$. Это означает, что при использовании, например, неподвижной мишени (мишень на подвесе) жидкое топливо всегда замерзнет в виде асимметричного слоя льда.

Использование движущейся мишени (метод FST, см. Рис.2.11а) позволяет избежать трудностей, присущих формированию твердого топлива в неподвижной мишени. Но при этом время существования жидкой фазы τ_{liquid} должно превышать время растекания слоя по оболочке τ_{sym} для достижения требуемого уровня симметрии слоя. Величина τ_{sym} определяется характером движения мишени в канале формирования. В Экспериментах №1 и №2 время τ_{sym} одинаково, так как мишени одной геометрии движутся в одном и том же канале. А вот время существования жидкой фазы различается в 3 раза из-за различия в величинах T_{in} . На Рис. 2.116 хорошо видно, что при движении мишени жидкий водород лишь только начал растекаться по внутренней поверхности оболочки. И поскольку начальная температура мишени $T_{in} = 15$ К достаточно близка к температуре вымораживания для $H_2(T_{tp} = 13.96$ K), то формирование твердого слоя началось еще до момента достижения требуемой равнотолщинности слоя. Таким образом, время τ_{liquid} – ключевой параметр, оно должно быть достаточным для достижения полной симметрии слоя.

Эксперимент №3. Начальная температура мишени перед ее инжекцией в спиральный канал формирования равна 26 К (температура начала вымораживания для $D_2 \rightarrow T_{tp} = 18.7$ К). Согласно фазовой диаграмме для D_2 , топливо внутри оболочки находилось в состоянии "жидкость+пар", т. е. неоднородность слоя по толщине составляла 100%. Характерное время существования жидкой фазы в процессе вымораживания топлива составило $\tau_{liquid} = 1.95$ сек. Симметричный слой толщиной 30 мкм (~ в 3 раза меньше, чем в Экспериментах №1 и №2) был сформирован при температуре 5.5 К за время $\tau_{form} = 3.74$ сек (Таблица 2.9).

Сделаем еще несколько замечаний относительно механизма динамической симметризации жидкого слоя в движущейся мишени. Выше было показано, что даже в случае высоких скоростей охлаждения жидкое топливо в неподвижной мишени неизбежно стечет на дно оболочки, и не позволит сформировать сферически симметричный криогенный слой. При определенных условиях, которые зависят от характера движения мишени в канале формирования, использование движущейся мишени позволяет избежать трудностей, присущих формированию криогенного слоя в неподвижной мишени (см. Диаграмму 1). Поэтому имеет смысл задача об оптимальной с той или иной точки зрения форме (геометрии) канала при заданных технологических ограничениях.

При качении мишени симметризация жидкого слоя может наступить только при условии непостоянства оси вращения. Если ось вращения постоянна, то ни о какой симметризации не может быть и речи. Это и понятно, так как в этом случае скорость вращения (следовательно, и центробежное "разбрызгивание" топлива) убывает по мере приближения к оси, приводя к скоплению жидкости вблизи точек, где ось вращения "протыкает" оболочку. Если же ось вращения меняется, то эффект центробежного "разбрызгивания" в среднем не убывает и в этих точках, и зависимость толщины слоя жидкости от сферических углов характеризуется уже появлением "средней" (во времени и в пространстве) компоненты. То, что непостоянство оси вращения оболочки оказывает существенное влияние на процесс симметризации слоя жидкости, хорошо видно из экспериментов, представленных на Рис. 2.12. Эти модельные эксперименты выполнены с целью визуального подтверждения сказанного выше: симметризация жидкого слоя топлива может наступить только при условии непостоянства оси вращения (Рис.2.12в). Если ось вращения постоянна, то можно рассчитывать лишь на достижение осевой симметрии слоя (Рис.2.12а и Рис.2.12б).



Рис.2. 12. Вымораживание водорода (H_2) и дейтерия (D_2) внутри полимерных (CH) оболочек: (a) и (б) ось вращения неизменна; (в) мишень со свободно вращающейся осью. Эксперименты выполнены с использованием R&B ячейки (Rotating and Bouncing cell) [28] (см. также Диаграмму 5).

Моделирование механизма динамической симметризации жидкого топлива выполнено в работе [23]. Полученные оценки для мишеней $\emptyset \le 1$ мм и простого спирального канала формирования представлены на Диаграммах 2а и 2б. Для мишеней большего диаметра, а тем более для мишеней реакторного класса, необходимо использовать и более сложные каналы в виде двойной или даже тройной спирали, чтобы обеспечить своеобразное "раскачивание" оси вращения оболочки за счет ее движения по траектории сложной геометрии [48,49]. Диаграмма 1. Время существования жидкой фазы – ключевой параметр для осуществления симметризации слоя по методу FST.



Метод FST: формирование криогенного слоя топлива внутри движущейся оболочки. При этом охлаждение через пятно контакта вращающейся оболочки с топливом сопровождается процессами динамической симметризации жидкого слоя и его вымораживания на внутренней поверхности оболочки. Результат: на выходе из канала формирования получаем готовую криогенную мишень.

Диаграмма 2а. Динамическая симметризация топливного слоя в движущейся мишени по методу FST (постановка задачи).

Уравнения движения:

$$\frac{\partial \mathbf{V}}{\partial t} + (\mathbf{V} \nabla) \mathbf{V} = -\frac{1}{\rho} \nabla P - g_{\otimes} \mathbf{e}_{z} + \nu \Delta \mathbf{V}$$
 — уравнение Навье-Стокса
 $div \mathbf{V} = 0$ — уравнение неразрывности

■ Уравнения движения можно свести к двумерным уравнениям "мелкой воды" на сфере. Для этого будем считать, что скорости жидкости не меняются поперёк слоя, а давление в слое обусловлено уравнением гидростатики поперёк слоя:

$$P = \rho \cdot \left(\frac{U_{\mathcal{G}}^2 + U_{\varphi}^2}{R} - g_{\bigotimes} \cdot \cos \theta \right) \cdot (r - R + H)$$
 — уравнение гидростатики

Обозначения: P – давление, v – кинематическая вязкость жидкости, H – толщина слоя, R – радиус внутренней поверхности мишени, \vec{g} - эффективное ускорение жидкости в неинерциальной системе координат движущейся мишени, \vec{V} – вектор скорости жидкости, ρ – плотность жидкости, V_i $(i=r, \varphi, \theta)$ – компоненты скорости жидкости в сферической системе координат, $\vec{\Omega}(t)$ – угловая скорость вращения оболочки, Θ, Φ – сферические углы вектора $\vec{\Omega}$. Диаграмма 26. Динамическая симметризация топливного слоя в движущейся мишени по методу FST (теория и эксперимент).

■ Решение задачи ищется при условии, что модуль угловой скорости Ω постоянен, а углы Θ и Φ меняются случайно и нескоррелировано вокруг их средних значений: $\Theta = \frac{\pi}{2} + \mu \cdot W_1(t)$ и $\Phi = \eta \cdot W_2(t)$, где $W_1(t)$ и $W_2(t)$ - случайные процессы в интервале [-1,1], а μ, η - численные коэффициенты (считаем их ≤ 1):

■ Неоднородность толщины жидкого слоя вдоль сферы оценивается как

$$H^{2} \cdot \left(R\Omega^{2} \cdot \left(\cos^{2} g + \frac{\mu^{2}}{3}\sin^{2} g + \frac{\eta^{2}}{3}\right) - g \cos g\right) \approx const$$

ОЦЕНКИ:
NU ~ 10% и меньше может быть достигну-
та при условии
$$\frac{\left(\mu^{2} + \eta^{2}\right)}{3} \leq 1 + \frac{\eta^{2}}{3} - \frac{g}{R\Omega^{2}} \leq 1.1 \cdot \frac{\left(\mu^{2} + \eta^{2}\right)}{3}$$
 > Теория: 9.7 см/сек $\leq V_{\text{мишени}} \leq 12$ см/сек
> Эксперимент: $V_{\text{мишени}} \sim 10$ см/сек

Диаграмма 3. Проблемы формирования качественного слоя из изотопов водорода при медленном охлаждении мишени (традиционные технологии).

 $\varepsilon_2 = 4.5$ мкм

■ Кристаллический D₂-слой, сформированный в мишени типа "Wetted Foam" [74,75]

Растрескивание моно кристалла в

Мишень "Wetted Foam" имеет порис-

тый слой. заполненный топливом.

процессе охлаждения [56]

From [58]: "If the temperature of the layered target decreases by more than a few degrees, then internal stresses may cause damage due to cracking or debonding at interfaces. If the temperature increases by more than a few degrees, then weakening of the DT ice may cause unacceptable deformations."

■ Кристаллический DT- слой после отвердевания в течение 17 часов; T =17.3 К [52] Общее время (формирование + другие стадии) изготовления мишени от 2 до 7 дней, что уже само является проблемой при переходе к реакторным технологиям (частота ~ 6 Гц)

Формирование

Шаг 1: Кристаллизация от единичной затравки в однородном температурном поле ($\Delta T < 1$ мК) при темпе теплоотвода q < 0.1 мК/сек

► Данная методика не применима к мишеням muna "Wetted Foam", поскольку развитая поверхность пор является стимулом к массовой кристаллизации вещества.

Шаг 2: Симметризация крио слоя за счет переконденсации вещества под действием градиента температуры вдоль поверхности слоя (методы IR-redistribution; β-layering).

► Получаемый слой неустойчив к вариациям температуры, и при охлаждении растрескивается из-за напряжений, связанных с изменением плотности вещества. Такая неустойчивость есть следствие:

- (a) анизотропии прочности кристаллических водородов
- (б) снижения прочности DT-слоя за счет накопления пузырьковых дефектов из-за выделения ³Не при β-распаде трития





Подчеркнем, что даже простой переход от цилиндрического канала к спиральному (см. Таблицу 2.9) уже дает технологические преимущества: во-первых, значительно увеличивается время пребывания мишени в канале формирования (спираль $\rightarrow 12$ сек, цилиндрическая геометрия $\rightarrow 8$ сек), во-вторых, спиральный канал имеет больший набор управляющих параметров для достижения требуемой симметрии слоя. К ним относятся: профиль температуры вдоль канала формирования, который позволяет увеличить время τ_{liquid} , геометрия спирального канала формирования (угол захода, диаметр и высота спирали), а также тип самой спирали.

При формировании криогенных мишеней требования на симметрию слоя всегда были достаточно жесткими. Современные представления по этому вопросу даны в Таблице 2.12 (см. также обзорную работу [58]): (1) отклонения ε_1 от сферичности и концентричности должны составлять не более 1%, (2) локальные неоднородности на поверхности топливного слоя (шероховатость, или гладкость слоя) ε_2 не должны превышать 1мкм.

1. DT смесь		2. Симметрия слоя		
Температура мишени	18.5 K	Тип	Сферическая	
Плотность пара	0.3 мг/см ³	ε1	< 1 %	
Плотность твердой фазы	250 мг/см ³	ε2	< 1 мкм	

Таблица 2.12. Требования на качество криогенного DT слоя.

Первый пункт мы уже обсудили (параметр ε_1) при рассмотрении вопроса о движении мишени в канале формирования. Остается еще один вопрос, связанный с достижением требуемой шероховатости слоя (параметр ε_2), который требует специального комментария. Этот вопрос напрямую связан с влиянием микроструктуры твердого топлива на качество криогенного слоя и сохранение этого качества вплоть до момента облучения мишени импульсом мощного лазерного излучения.

В настоящее время в мировой практике разработано несколько подходов к формированию криогенного слоя топлива. Получаемые в экспериментах слои представляют собой поликристаллическую структуру, уровень дисперсности которой зависит от применяемого метода формирования, а точнее от скорости охлаждения конденсированного топлива (см. Главу 1):

I. Медленное охлаждение: США (NIF, OMEGA,) Франция [58]

• Общепринятый метод охлаждения DT топлива ниже тройной точки со скоростью ~ 3•10⁻⁵ К/с и последующей симметризацией слоя по методу β-layering (либо IR-redistribution) позволяет получить криогенный слой типа монокристалл с гладкой внутренней поверхностью.

<u>Результаты эксперимента</u>: получаемые слои крайне чувствительны (неустойчивы) к внешним тепловым и механическим воздействиям (см. Диаграмму 3).

II. Скоростное охлаждение: ФИАН (Россия, см. обзорную работу [49])

■ Методом десублимации топлива (скорость охлаждения >100 К/с) на глубоко охлажденной стенке мишени формируется гладкий стеклообразный топливный слой

<u>Результаты эксперимента</u>: малая толщина слоя — не более 10 мкм.

III. Умеренные скорости охлаждения: ФИАН (Россия) [49]

■ Методом FST (скорость охлаждения 1÷50 К/с) сформирован термостойкий изотропный ультрадисперсный слой с требуемой гладкостью внутренней поверхности

<u>Результаты эксперимента</u>: метод перспективен для развития реакторных технологий формирования слоя. Закономерно встает вопрос, почему же в экспериментах (см. Рис.2.10 и Рис.2.11) полученные по методу FST структуры явно относятся к крупно кристаллической фазе, не обладающей требуемым уровнем гладкости криогенного слоя. Это связано с тем, что первоначально мы использовали только чистые изотопы водорода. Основные усилия были направлены на получение сферически симметричных криогенных слоев.

В последующих исследованиях условия проведения экспериментов были изменены. Высокие скорости охлаждения сочетались с применением высокоплавких добавок к топливу (комбинированный метод FST). Это позволило быстро (менее чем за 15 сек) сформировать устойчивый изотропный твердый слой в ультрадисперсном состоянии: Рис.2.13а \rightarrow водород (кадр 1 \rightarrow H₂ без примесей, кадр 2 \rightarrow H₂+5%HD), Рис.2.13б \rightarrow дейтерий (кадр 3 \rightarrow D₂ без примесей, кадр 4 \rightarrow D₂ + 3%Ne). Роль добавок с очевидностью демонстрируют четные кадры эксперимента. Отметим, что локальные неоднородности на поверхности слоя при использовании добавок составили $\varepsilon_2 = 0.15$ мкм (см. Рис.2.15в), что удовлетворяет требованиям Таблицы 2.12. Более подробно данный вопрос обсуждается в Главе 1 (см. также работу [49]). Мы лишь кратко остановимся на двух аспектах, важных для последующего изложения.

По влиянию на структуру ближнего порядка силы взаимодействия можно подразделить на два вида: направленные и ненаправленные. Твердые изотопы водорода относятся к веществам с ненаправленной связью. Для таких веществ применение добавок позволяет существенно снизить скорость охлаждения, требуемую для формирования ультрадисперсных слоев и повысить устойчивость (термостойкость) слоя, поскольку высокоплавкие добавки к топливу тормозят диффузионные процессы в веществе, повышая энергию активации диффузии, а также обеспечивают условия для инициации и массового роста дислокаций, препятствующих образованию крупно кристаллической фазы. По существу, легирующие добавки к топливу обеспечивают получение новых функциональных материалов.

С другой стороны, наличие добавок позволяет перейти к реализации условий, отвечающих практическому созданию новой технологии. Это связано с тем, что формирование прозрачных криогенных слоев требуемого качества без использования добавк к топливу возможно лишь при достижении очень высоких скоростей охлаждения (q > 100 K/ с, см. Puc.2.13), а также при союлюдении специальных условий эксперимента. Для создания надежной и дешевой технологии поточного (или конвейерного) производства мишеней необходимо снизить скорости охлаждения на полтора - два порядка. Именно это и позволяют сделать легирующие высокоплавкие добавки к топливу [49]. Отметим, что для стандартной DT смеси (50% молекул DT, 25% дейтерия и 25% трития) такой добавкой служит непосредственно тритий, присутствующий в исходной композиции топлива. Мы провели исследования по вымораживанию смеси дейтерия с различным процентным содержанием Ne (3%÷20%), который моделирует тритий в наших экспериментах, и получили желаемый результат (см. Рис.2.14 (кадр 4) и Рис.2.15а,б). Цель этих экспериментов показать перспективность метода FST при работе с DT смеси.

Еще один важный момент – это выживаемость топливных слоев в процессе доставки мишени в лазерный фокус. При рассмотрении данного вопроса мы руководствовались тем фактом, что столь различные элементы как ⁴He, ³Co,²⁹ Mg, ²⁹ and Re ²⁹, кристаллизующиеся в

гексагональную плотноупакованную структуру (hcp- фаза), имеют очень похожие зависимости величины скорости звука от направления [78,79]. В работах [66, 67] обнаружено, что анизотропия скорости звука также присуща hcp- фазам изотопов водорода, и для H₂ и D₂ составляет около 20% (продольный звук) и 33% (поперечный звук).

В равновесном состоянии твердые изотопы водорода состоят из анизотропных молекулярных кристаллов. В соответствии с теорией Дебая, решеточная теплопроводность прямо пропорциональна величине скорости звука. Поэтому, даже при условии равномерной тепловой нагрузки на поверхность мишени (имеется в виду процесс транспорта мишени в реакторной камере с горячими стенками), возникает различие в радиальном градиенте температур в случае анизотропного криогенного слоя (более детально вопрос рассмотрен в Главе 1, §7).



q ~ 0.02 K/c



q > 100 K/c

Рис. 2.13. Различные скорости охлаждения приводит к формированию криогенных слоев водорода с различной степенью структурирования (или с различным уровнем дисперсности). В предсавленных экспериментальных результатах какие-либо добавки к топливу не использовались. В этом случае прозрачные криогенные слои получаются только при достижении сверх высоких скоростей охлаждения, более 100 К/ с.



H₂ (W= 51 мкм) Оболочка Ø 1.4 мм





H₂+5%HD (W= 44 мкм) Оболочка Ø 1.4 мм



D₂ (W = 48 мкм) Оболочка Ø 1.4 мм

D₂ + 3%Ne (W= 50 мкм) Оболочка Ø 1.5 мм

Рис.2.14. Формирование и стабилизация ультра дисперсной структуры криогенного слоя.

(a)

(б)



Рис.2.15. Результаты FST- формирования слоя (а и б) при использовании добавок к топливу (20%). Справа (с) результат характеризации криогенного слоя для мишени на рисунке (б), полученный с помощью 100- проекционного видео томографа (проект МАГАТЭ №1557)[14,15,18,26,29,30].

Это является причиной сферически асимметричной сублимации топливного вещества, что приводит к росту шероховатости слоя и его разнотолщинности при доставке первоначально идеальной мишени в фокус лазерной установки. Таким образом, формирование изотропных ультрадисперсных криогенных слоев является не только условием получения качественного топлива, но и условием сохранения этого качества вплоть до момента облучения мишени [35,36,49]. В заключение данного раздела подчеркнем следующие важные аспекты, касающиеся метода FST:

■ Результаты, полученные в рамках созданной базовой модели, находятся в хорошем согласии с экспериментально наблюдаемым временем FST- формирования криогенного слоя и уровнем его симметрии. Поэтому, естественно считать, что именно механизм контактной теплопроводности и динамической симметризации топлива реализуются на практике.

• Темп отбора контролируется размером контактного пятна, который может быть изменен в эксперименте за счет изменения геометрии канала (χ_g), а также выбора материала мишени и параметров процесса охлаждения (χ_t). Это открывает определённые возможности для оптимизации метода FST для мишеней различного дизайна.

■ Реализация высоких скоростей охлаждения (1÷50 К/с) при использовании высокоплавких добавок к топливу позволили быстро (менее чем за 15 сек) сформировать с помощью метода FST устойчивый изотропный твердый слой в ультрадисперсном состоянии.

■ Подход, основанный на работе с движущимися бесподвесными мишенями, по сути, является принципиально новой альтернативой существующим технологиям, так как позволяет формировать криогенные мишени в заданном частотном режиме (см. Рис.2.16). Практическим воплощением данной инновационной технологии станет разработка прототипа фабрики мишеней для реакторов ИТС.



Рис. 2.16. Криогенные мишени для прямого облучения производства ФИАН: (a) полимерная СН оболочка диаметром 1.23 мм, на внутренней поверхности которой сформирован слой из твердого дейтерия толщиной 41 мкм, (б) частотная подача мишеней в накопитель.

■ Кроме того, бесподвесный подход позволяет проводить исследования в области технологии криогенных мишеней статистически. Количество мишеней, исследуемых за один эксперимент, здесь может достигать 10÷15 штук (традиционный подход позволяет изучать только 1 мишень за эксперимент). А это экономит время, затрачиваемое на исследования, повышает надежность получаемых результатов, а также существенно снижает расходы на проведение экспериментов.

■ На основании полученных результатов разработан численный код и соответствующий пакет прикладных программ для прогнозирования и анализа экспериментальных результатов по производству криогенных мишеней методом FST [23].

В следующих параграфах мы более детально рассмотрим особенности FST- формирования криогенных мишеней прямого сжатия, начиная от дизайна мишеней для установки OMEGA (§ 2) до мишеней реакторного класса (§ 4).

1.3.3. Резюме: структурно - чувствительные методы и метод FST

В работе Ю.Д.Третьякова и Е.А.Гудилина [80] дано очень точное и, вместе с тем, наглядное определение того, что есть вещество и материал, и какова роль структурно - чувствительных методов в получении новых функциональных материалов:

"Вещество и материал. Все материалы имеют различный состав, разное агрегатное состояние (твердое тело, жидкость, газ), могут представлять собой вещество в различных аллотропных модификациях (графит-алмаз) или смесь нескольких веществ (глина). С учетом всех этих факторов можно записать следующее определение:

МАТЕРИАЛ =

[состав вещества (A) + агрегатное состояние (A) + аллотропная модификация (A)] +

[состав вещества (Б) + агрегатное состояние (Б) + аллотропная модификация (Б)] + ...

Однако это явно неполная характеристика. Важнейшая дополнительная "координата", которая определяет конструкционные и функциональные параметры материала, это естественные или искусственно созданные в нем дефекты, их тип, пространственная организация и взаимодействие на различных иерархических уровнях. Достаточно упомянуть полупроводниковые материалы, в которых благодаря прецизионному контролю дефектообразования удалось создать первые интегральные схемы.

Дефекты, или в более общем смысле микроструктура, определяют многие важнейшие структурно - чувствительные свойства материала. Поскольку суммарная характеристика состава вещества, его агрегатного состояния и аллотропной модификации могут быть заменены более общим понятием "фаза", то предыдущее определение преобразуется в более общее и, на первый взгляд, более простое:

$Mamepuan = \Phi asa(ы) + Muкроструктура.$

Таким образом, материал — это реальная форма существования фазы или совокупности фаз. И если химик-синтетик ограничивается получением индивидуальных фаз, то материаловеду кроме этого необходимо сформировать оптимальную микроструктуру. Часто эта задача намного сложнее, чем получение индивидуальной фазы, особенно если необходимо воспроизвести методику в серийном производстве".

Метод FST относится к структурно – чувствительным методам, цель которого заключается именно в том, чтобы сформировать оптимальную микроструктуру топлива применительно к задачам ИТС (см. также Приложение 5). Экстремально высокие скорости охлаждения при наличии добавок к топливу позволяют получать предельно разупорядоченные структуры с большой плотностью дефектов, т.е. изотропную среду (или, т.н., ультрадисперсные слои). Такие слои относятся к классу слоев, обладающих повышенной механической и тепловой устойчивостью, что минимизирует риск потери качества слоя в процессе доставки мишени в реакторную камеру, а также на этапе сжатия при прохождении по слою 1-ой ударной волны [49].

По сути, данная работа посвящена обзору результатов, полученных авторами именно в этой области. В ней также обсуждаются технологически элегантные решения, основанные на методе FST, с целью показать надежный путь для создания массового поточного производства криогенных топливных мишеней для дальнейшего развития исследований по программе ИТС.

§ 2. FST – формирование мишеней класса OMEGA для энергии лазера $E_1 = 30$ кДж

В традиционном подходе формирование твердого криогенного слоя толщиной до 100 мкм внутри полимерной оболочки $\emptyset \sim 1$ мм осуществляется способом кристаллизации от единичной затравки при достаточно медленном охлажлении топлива $q \sim 3 \cdot 10^{-5}$ К/с (см. обзорную работу [58]). При этом вариации температуры на поверхности мишени не должны превышать величины $\delta T \sim 1$ мК.

Таблица	2.13.	Характерные	параметры	эксперимента	для	существующих	методов	фор-
мировани	ия сло	ОЯ.						

Метод	Время	Вид	Скорость производства
	формирования	топлива	мишени
β-layering	> 5 часов	Только DT	Частотность отсутствует (мишень на подвесе)
IR- redistribution	IR- stribution ~ 24 часа D_2/DT		Частотность отсутствует (мишень на подвесе)
FST	<15 сек	D ₂ / DT	Частота 0.1 Гц (сейчас) (бесподвесная мишень)

Симметризация полученного твердого слоя осуществляется за счет переконденсации вещества под действием градиента температуры, создаваемого вдоль поверхности мишени (см. Таблицу 2.13: методы β -layering [58] и *IR-redistribution* [58]). Отличительной особенностью методики симметризации является тот факт, что градиент температуры снижается по мере выравнивания слоя по толщине, так что процесс переконденсации происходит с экспоненциальным затуханием.

Отметим, что получаемый равнотолщинный прозрачный слой сохраняет свое качество только в очень узкой температурной области вблизи тройной точки топлива. Такая высокая чувствительность к изменению внешних условий является дополнительной технологической



Рис.2.17. Мишень на подвесе

сложностью, и может привести к росту разнотолщинности и шероховатости слоя сверх допустимого значения при доставке мишени в зону облучения (см. Диаграмму 3).

Таким образом, хотя традиционный подход и позволяет сформировать топливный слой требуемого качества (сферически симметричный гладкий слой), однако его существование в исходном варианте ограничено из-за растрескивания монокристалла даже при малом изменении температуры. При этом также резко падает и качество поверхности слоя. Так, например, измерения, выполненные в работе [56], показали, что при уменьшении температуры менее, чем на 2 К,

гладкость поверхность криогенного слоя падает более, чем в 2 раза: с $\varepsilon_2 = 2.0$ мкм до $\varepsilon_2 = 4.5$ мкм (см. Диаграмму 3).

• Резюме. Характерными особенностями традиционных технологий являются:

 – Работа с мишенью, укрепленной на специальном держателе или подвесе (Рис. 2.17), что исключает возможность осуществить частотную доставку мишени способом инжекции,

 – Длительное формирование топливного слоя – от 5 до 24 часов, что не отвечает требованию минимизации расхода трития в элементах мишенной системы (Таблица 2.13),

 Высокая чувствительность топливного слоя к вариации внешних условий, что неизбежно приведет к деградации качества мишени в процессе ее доставки в реакторную камеру (Диаграмма 3).

Получение термостойких криогенных слоев связано с переходом к методу FST, что означает, прежде всего, реализацию высоких скоростей охлаждения $\rightarrow 1 \div 50$ К/с. Рассчитаем время формирования мишени класса OMEGA методом FST. Исходные параметры мишени рассчитывались согласно Таблице 2.2. и представлены в Таблице 2.14.

OMEGA: R = 460 мкм, ΔR= 3 мкм, W = 100 мкм	D ₂	DT
Масса мишени [мкг]	50.2	61.6
Масса оболочки [мкг]	8.4	8.4
Масса топлива [мкг]	41.8	53.2
Плотность заполнения [мг/ см ³]	102.6	130.5
Давление заполнения [атм]	1097.5	1134.3

Таблица 2.14. Параметры мишени класса ОМЕGA

Таблица 2.15. Время FST- формирования криогенного слоя из D₂ для мишени класса OMEGA.

ОМЕGA R = 460 мкм ΔR= 3 мкм W = 100 мкм	<i>R_{ca}</i> (мкм)	χ_{g} (10 ⁻⁴)	<i>R_{eff}</i> (мкм)	$\frac{\gamma_{eff}}{(10^{-4})}$	τ _{liquid} (сек)	$ au_{solid}$ (сек)	τ _{form} (сек)
Первая ста-			42.9	21.7	3.4		
дия	12.0	1.70					4.8
Вторая ста-			41.5	20.4		1.4	
дия							

Обозначения: R_{ca} и R_{eff} - радиусы геометрического и эффективного пятна контакта

Согласно методу FST две стадии будут важными при формировании мишени: **1) Первая стадия:** охлаждение жидкой фазы топлива от начальной температуры T_{in} = 37.0 К до температуры тройной точки T_{tp} (τ_{liquid}),

2) Вторая стадия: вымораживание слоя при температуре $T = T_{tp}$ (τ_{solid}).

Полное время формирования составит величину $\tau_{form} = \tau_{liquid} + \tau_{solid}$. Данные расчета для мишени класса OMEGA представлены в Таблице 2.15. Хорошо видно, что величина γ_{eff} мало меняется при переходе от одной стадии формирования к другой. Поэтому в дальнейшем при проведении расчетов можно вполне пользоваться средней величиной $\langle \gamma_{eff} \rangle$. Следует также отметить, что в литературе отсутствуют данные по теплопроводности DT смеси в диапазоне температур 39÷20 К. Поэтому, для DT слоя мы вынуждены ограничиться лишь оценками по времени формирования, которые дают $\tau_{form} = 5.34$ сек.

Таким образом, мы показали, что реализация высоких скоростей охлаждения по методу FST позволяет *за малое время* сформировать криогенный DT слой, а значит обеспечить минимизацию расхода трития в мишенной системе. Особо подчеркнем, что достижение высоких скоростей охлаждения имеет огромное значение и с точки зрения получения заданной структуры топлива. Кроме того, реализация формирования слоя в движущихся оболочках – это прекрасная перспектива перехода к частотному производству мишеней. Это означает, что метод FST может служить основой для создания технологии формирования мишеней для мощных лазерных установок и реактора.

§ 3. FST – формирование мишеней класса HiPER для энергии лазера E₁ = 200 кДж

Характерная особенность текущего этапа в развитии ИТС – это разработка научной и технологической базы для высокочастотной подачи топлива в фокус мощной лазерной установки или реактора (в зарубежной терминологии – эра High Rep-Rate).

С этой целью в Европе создается мощная лазерная установка HiPER (High Power laser Energy Research) [59], работа на которой потребует формирования и доставки криогенных мишеней ударного поджига с частотой $\nu \ge 1$ Гц.

В настоящее время рассматривается два типа оболочек для базовой мишени класса HiPER (Baseline Target-2 или BT-2), геометрические параметры которых, а также параметры топливного слоя, представлены в Таблицах 2.16 и 2.17.

Мишень типа ВТ-2	Внешний (компактный	слой полимер)	Топливный слой (дейтерий)		
Внешний радиус	1047	МКМ	1044	МКМ	
Толщина слоя	3	МКМ	211	МКМ	
Внутренний радиус	1044	МКМ	833	МКМ	

Таблица 2.16. Геометрические параметры мишени типа BT-2.

Мишень типа	Внешний слой		Внутренний слой		Топливный слой	
BT-2a	(комп	актный полимер)	(пори	стый полимер)	(иде	г за пористым)
Внешний радиус	1023	МКМ	1020	МКМ	950	МКМ
Толщина слоя	3	МКМ	70	МКМ	120	МКМ
Внутренний радиус	1020	МКМ	950	МКМ	830	МКМ

Таблица 2.17. Геометрические параметры мишени типа ВТ-2а.

Напомним, что мишень должна быть бесподвесной, т.е. формироваться методом FST. Это является принципиальным условием, которое позволяет осуществить частотное формирование мишени и ее инжекцию в лазерный фокус.

Проектирование FST-модуля для обеспечения экспериментов по программе HiPER ($E_{\pi} \sim 200 \text{ кДж}, v \geq 1 \Gamma$ ц) сферическими криогенными мишенями ($\emptyset \sim 2 \text{ мм}, W \sim 200 \text{ мкм}$) выполнено ФИАН (Группа Криогенных Мишеней в коллаборации с ОАО Красная Звезда и ООО Крио Трэйд) в рамках проекта МНТЦ №3927 и при финансовой поддержке Совета Научно-Технических Ресурсов (Великобритания). В данном проекте проведен экспертный анализ и доказана возможность формирования мишеней класса HiPER методом FST. Полученные ре-

зультаты были использованы при дизайне прототипа FST- модуля формирования для мишеней указанного типа (везде далее прототип FST-MФ-HiPER). Цель настоящего раздела - детально обсудить результаты, полученные в рамках проекта МНТЦ №3927.

Технологически, алгоритм проведения экспериментов по формированию мишеней методом FST реализуется следующим образом (см. Рис. 2.18):

■ Заполнение оболочек топливным газом при комнатной температуре (300 K).

■ После процедуры заполнения при 300 К, мишенный контейнер (МК) с заполненными оболочками переносится при той же температуре от системы заполнения к модулю формирования для последующего проведения экспериментов по методу FST.

■ Перед началом экспериментов, МК с заполненными оболочками охлаждается до температуры разгерметизации *T_d*, существенно более низкой, чем комнатная температура. Указанная процедура необходима для осуществления разгерметизации МК, т.е. удаления из мишенного контейнера топлива, находящегося вне оболочек.

■ Следующий шаг – это проброс мишеней в канале формирования, т.е. собственно формирование криогенного слоя внутри движущейся оболочки (метод FST).

■ На выходе из канала формирования готовые мишени инжектируются в тестовую камеру (детальное описание экспериментального комплекса, а также характеристики и параметры оборудования представлены в Приложении 1 к Главе 1).

Таким образом, цикл FST-формирования, за исключением процедуры характеризации [14,15,18,26,29,30], включает следующие основные стадии:

(1) заполнение оболочек топливом,

(2) разгерметизация мишенного контейнера,

(3) формирование в движущихся оболочках собственно криогенного слоя,

(3) доставка (инжекция) готовой мишени в тестовую камеру (или в камеру реактора).



Рис. 2.18. Полный цикл FST- формирования криогенной топливной мишени.

Ниже мы рассмотрим вопросы подготовки FST- экспериментов для мишеней класса HiPER с учетом особенностей всех стадий процесса формирования мишени. При этом учитывается возможность работы прототипа FST-MФ-HiPER не только как автономного устройства, но и как интегральной части установки по частотному производству мишеней, их сборки со специальным носителем, а также инжекционной доставке в фокус мощной лазерной установки [41-43] (см. Приложение 7). Для достижения поставленной цели необходимо определить набор параметров, который позволяет провести оптимизацию замкнутого цикла FST- формирования для производства мишеней любого класса. Приведем перечень основных параметров оптимизации:

- 1. Требуемая плотность заполнения ρ_f
- 2. Требуемое давление заполнения P_f
- 3. Допустимый перепад давления на стенке оболочки ΔP
- 4. Скорость заполнения dP/dt
- 5. Время заполнения t_f
- 6. Температура разгерметизации *T_d*
- 7. Давление топлива внутри мишени при *T_d*
- 8. Оптимальная температура входа мишени в канал формирования *T_{in}*
- 9. Давление топлива внутри мишени при Т_{іп}
- 10. Время формирования au_{form}
- 11. Геометрия канала формирования (см. Приложение 6):
 - Тип спирали (одиночная, двойная, трилистник),
 - Параметры спирали (угол захода, длина спирали, ее шаг и диаметр),
 - Спираль с переменными параметрами.

В следующих разделах мы перейдем к расчету значений указанных параметров оптимизации, полный список которых будет представлен в пункте 3.5.

3.1. Заполнение массива бесподвесных оболочек D₂ и DT топливом

Наиболее распространенным способом заполнения оболочек топливным газом является диффузия. Задача минимизации объемов трития, а также радиационных дефектов, возникающих в стенке полимерной оболочки вследствие его распада, требует тщательного анализа процесса заполнения одно- и многослойных оболочек газообразным топливом. Поэтому построение системы, способной заполнить мишень до 1000 атм при комнатной температуре, требует точного знания зависимости внутреннего давления от времени для различных схем заполнения [12, 13]. Поскольку прочностные параметры и коэффициенты газопроницаемости материалов стенки мишени могут быть переменными величинами, то на первое место в исследовании проблемы заполнения мишеней топливным газом выходят методы математического моделирования.

В рамках проекта МНТЦ № 3927 выполнено моделирование и решена задача о заполнении оболочек ВТ-2 и ВТ-2а реальным газом в режиме ramp filling, т.е. в режиме с постоянным максимально возможным градиентом давления на стенке оболочки для минимизации времени заполнения диффузионным методом. Разработана соответствующая программа и создано программное обеспечение для расчета времени и скорости заполнения. Данные по свойствам материалов взяты из Приложения 1. Полученные результаты (см. Рис. 2.19а) позволяют заключить, что существующая в ФИАН система заполнения может реализовать работу с массивом бесподвесных оболочек (как ВТ-2, так и ВТ-2а) и заполнить их до 1000 атм при комнатной темрературе, осуществляя при этом прецизионную подачу давления в мишенный контейнер (менее 1 атм/мин), чтобы не разрушить находящиеся в нем оболочки с низкой прочностью (например, полистирол или GDP полимер), а также осуществить заполнение и более прочных оболочек, например, из полиимида.

В основу работы системы заполнения полимерных оболочек положена идея непрерывного (или квази-непрерывного) повышения давления в камере заполнения таким образом, чтобы разность давлений внутри и снаружи оболочки не превышала определенной величины, определяемой прочностью оболочки (ramp filling режим, см. Таблицу 2.18). При этом осуществляется автоматический контроль и управление рабочими характеристиками системы заполнения. Отметим, что расчет процедуры заполнения позволяет определить время достижения заданного давления на любой промежуточной стадии. В Таблице 2.18 строка (1) соответствует заполнению однослойной оболочки типа BT-2 с параметрами $R_0 = 1020$ мкм, $\Delta R = 3$ мкм. Это оболочка BT-2a (строка (2)), но без внутреннего пористого слоя. Мы легко можем сравнить по времени ход кривой заполнения при наличии пористого слоя и в случае, когда толщина пористого слоя $w_{parans} = 0$.

D ₂ топливо	<i>t</i> _{f200}	t_{f400}	<i>t</i> _{f600}	<i>t</i> _{f800}	<i>t</i> _{f1000}
(1) BT-2	10,97	19,38	26,05	31,45	35,93
(2) BT-2a	13,72	24,26	32,59	39,36	44,96
DT топливо					
(1) BT-2	12,57	22,21	29,85	36,05	41,18
(2) BT-2a	15,69	27,74	37,28	45,01	51,42

Таблица 2.18. Время заполнения оболочек класса HiPER в режиме ramp filling.

Обозначения: t_{f200} , t_{f400} , t_{f600} , t_{f800} и t_{f1000} - время заполнения в часах до 200, 400, 600, 800 и 1000 атм, соответственно.

Особо стоит вопрос о заполнении оболочек радиоактивным DT топливом. В отличие от дейтерия D₂, радиоактивный тритий T₂, входящий в состав газообразной DT смеси, может влиять на прочностные свойства оболочки.

Если радиационные дефекты существенны для материала оболочки, то газопроницаемость и, конечно же, механическая прочность оболочки, несомненно, являются функцией ее структуры: радиационные дефекты, накапливаясь со временем, приводят к структурным изменениям в полимерных материалах (актуально как для BT-2, так и для BT-2a). В свою очередь, это ведет к изменению прочности и газопроницаемости оболочки, которые теперь уже можно рассматривать как функции от времени заполнения. Поэтому возможность заполнения оболочек DT смесью при постоянном градиенте давления отлична от традиционного заполнения нерадиоактивными изотопами. Масштаб изменений зависит от величины времени заполнения. Поэтому в проекте осуществлено моделирование скорости заполнения полимерных оболочек типа HiPER при наличии радиационных дефектов, т.е. при учете зависимости прочности и проницаемости оболочки от времени [41,45,46].

Для создания математической модели процесса заполнения тонкостенной сферической оболочки до высоких давлений был предложен подход, основанный решении краевой задачи Коши для нелинейных параболических уравнений с нелинейными граничными условиями.

Нелинейность модели связана как с нелинейностью зависимости давления от плотности газа (уравнение *Baн-dep-Baaльca*), так и с влиянием некоторых параметров системы «полимерная оболочка - топливный газ» на режим заполнения [41,45,46]. Среди них: зависимость прочности и газопроницаемости оболочки от материала и геометрии мишени, от температуры и давления газа, от структурных изменений, накапливаемых в полимерах вследствие распада трития во время заполнения оболочки DT смесью, и т.д. Численное решение задачи о заполнении однослойной BT-2 и двухслойной оболочки BT-2a DT смесью при наличии радиационных дефектов в материале оболочки дано ниже. Расчеты проведены при следующих условиях:

1) Приоритетный материал внешнего слоя оболочки – GDP полимер ($\rho_{sh} = 1.2 - 1.04 \ [г/см^3]$), для которого модуль Юнга равен $E = 2.6 \ \Gamma\Pi a$, коэффициент Пуассона v = 0.3.

2) Газопроницаемость GDP полимера по отношению DT смеси в случае, если радиационные дефекты не существенны для материала оболочки, равна $K_{DT} \sim 5.8 \ 10^{-15}$ [моль м /м² с Па].

3) Газопроницаемость пористого слоя $K_2 = 100 K_1$, где $K_1 = 5.8 \ 10^{-15}$ [моль м /м² с Па] есть коэффициент газопроницаемости внешнего слоя из компактного полимера.

4) Заполнение DT смесью:

• $\gamma_3 = \gamma = \gamma_1 = \gamma_2 = 0$ – радиационные дефекты отсутствуют (*кривая маркирована кружком*); • если нет, то $\gamma_3 = 2 \cdot 10^{-6} > \gamma_1 = 10^{-6} > \gamma_2 = 0,5 \cdot 10^{-6}$ (*кривая маркирована квадратом*): при этом газопроницаемость $K_i = k_i \cdot (1 + \gamma_i), i_{\text{Ng слоя}} = 1, 2$, а прочность оболочки $\Delta P_{ext}(t) = \Delta P_{ext}^0(1 - \gamma_3)$



(a) Управляющая кривая, или скорость заполнения (до 1000 атм при 300 К) как функция времени для трех различных материалов оболочки: полиимид, полистирол и GDP-полимер.



(б) Влияние радиационных дефектов на ход процесса заполнения для оболочек типа ВТ-2 и ВТ-2а.

Рис. 2.19. Результаты моделирования стадии заполнения для мишеней класса HiPER.

Результаты расчета представлены на Рис. 2.196. Видно, что, накапливаясь со временем, радиационные дефекты приводят к увеличению времени заполнения. Для случая мишени BT-2 указанное изменение составляет ~ 8%, а для BT-2a ~ 11%. Это в свою очередь может привести к изменению вида "управляющей кривой" dP/dt = F(t) (см. Рис. 2.19а). Отметим, что корректировка работы системы заполнения осуществляется на основании именно этой кривой, и таким образом, чтобы разность внешнего и внутреннего давлений на стенке оболочки не превосходила механической прочности оболочки. Так, например, для полистирола допустимый перепад давления на стенке оболочки BT-2 составляет $\Delta P = 0.29$ atm [41,45,46], и должен поддерживаться в течение всей процедуры заполнения: т. е., требуется прецизионная, с высокой точностью подача давления в мишенный контейнер.

Таким образом, если радиационные дефекты существенны для материала оболочек класса HiPER, то газопроницаемость и, конечно же, механическая прочность оболочки, несомненно, являются функцией ее структуры: радиационные дефекты (масштаб изменений зависит от величины времени заполнения: см. Рис. 2.19б) приводят к структурным изменениям в полимерных материалах. Поэтому возможность заполнения оболочек DT смесью при постоянном градиенте давления отлична от традиционного заполнения нерадиоактивными изотопами.

Это означает, что при заполнении оболочек радиоактивным топливом в течение длительного времени необходимо иметь достоверную информацию о влиянии излучения на свойства используемых полимеров. Это позволит либо учесть возникающие изменения, либо перейти к рассмотрению других материалов в дизайне мишени.

3.2. Разгерметизация мишенного контейнера

После процедуры заполнения при 300 К, контейнер с заполненными оболочками переносится при той же температуре от системы заполнения к модулю формирования для последующего проведения экспериментов по методу FST. Перед началом экспериментов контейнер с заполненными оболочками, находясь внутри модуля формирования, охлаждается до температуры T_d , существенно более низкой, чем комнатная температура. Это необходимо для осуществления его разгерметизации, т.е. удаления из мишенного контейнера паразитного газа, находящегося вне оболочек (см. Рис. 2.20).



Рис. 2.20. Последовательность операций при разгерметизации мишенного контейнера.

Возможность осуществить процедуру разгерметизации мишенного контейнера в условиях, исключающих как разрушение оболочки внутренним давлением, так и утечку из нее топлива вследствие обратной диффузии, появляется лишь при условии понижения температуры [71], когда давление газа в оболочке падает, газопроницаемость ее стенки снижается, а прочность материала оболочки растет. Так как давление газа в оболочке не зависит от материала ее стенки, то возможность осуществления того или иного варианта определяется лишь прочностью используемой полимерной оболочки σ и величиной ее аспектного отношения δ_{sh} . Это еще раз подчеркивает важность надежной исходной базы данных (как при комнатных, так и при криогенных температурах) по свойствам полимеров, используемых для производства криогенных мишеней любого класса.

Расчеты, определяющие условия безопасной разгерметизации мишенного контейнера, проводились согласно следующим формулам:

$$P_{ts} = 2 \sigma \delta_{sh}, \ \delta_{sh} = \Delta R / R,$$

где P_{ts} - разность давлений внутри и вне оболочки непосредственно перед моментом ее разрушения, σ – предел прочности оболочки на растяжение.

Для определения условий разгерметизации, т.е. определения давления внутри оболочки $P(\rho_f, T_d)$, мы использовали уравнение Ван-дер-Ваальса (2.2), рассчитанное по специальной программе с учетом зависимости параметров R_g , *a* и *b* от температуры (см. Рис. 2.20а,б):

$$P(\rho_f, T_d) \leq P_{ts},$$

где T_d – температура разгерметизации, а ρ_f - плотность топливного газа при заполнении.

Если оболочка заполнена, то простое соотношение связывает плотность топливного газа ρ_f и обратное аспектное отношение криогенного слоя $\delta_{cl} = W / R_0$:

$$\rho_f = \rho_c(T) \cdot (1 - (1 - \delta_{cl})^3) + \rho_v(T) \cdot (1 - \delta_{cl})^3$$

где ρ_c и ρ_v - плотности конденсированной (жидкой или твердой) и газовой фазы топлива, W - толщина криогенного слоя, R_0 - внутренний радиус оболочки. Для анализа возможных ситуаций при разгерметизации мишенного контейнера удобно ввести параметр θ :

$$\theta = \frac{\rho_f}{\rho_{cp}},$$

где ρ_{cp} величина критической плотности для заданного топливного вещества (D₂ или DT смесь).

Заметим, что предел прочности материала оболочки на растяжение, σ , зависит от технологии изготовления и возрастает с понижением температуры [71], тогда как давление топливного газа падает (см. Рис. 2.21). Принципиально могут реализоваться две ситуации (см. Рис. 2.22):

– при определенной температуре T_d , величина σ окажется достаточной для сброса давления в мишенной кассете, когда топливо остается еще газообразным ($T_d > T_{cp}$);

– в противном случае, требуемое снижение давления может быть достигнуто только при температуре $T_d \leq T_{cp}$, что неизбежно приведет к ожижению топлива в контейнере.

Расчеты [41,45,46] (см. также Таблицу 2.19), проведенные для оболочек ВТ-2 и ВТ-2а, содержащих как D₂, так и DT топливо, показали, что реализация варианта, когда удаляется топливный газ, возможна лишь для высокопрочных оболочек. При более низкой прочности разгерметизацию можно осуществить только в условиях, когда топливо находится в состоянии сжатой жидкости ($T_s < T_d < T_{cp}$), или двухфазном состоянии "жидкость+пар" ($T_d < T_s$), которое реализуется в результате фазового перехода 1-го рода при охлаждении оболочки ниже линии насыщения (см. Рис. 2.23).

С учетом некоторого запаса по прочности оболочки, технологические рекомендации для проведения экспериментов по FST- формированию криогенного слоя топлива для мишеней класса HiPER представлены в Таблице 2.19.

Оболочка	Прочность	Условия	Прочность	Условия
BT-2 [41]	$\sigma \ge 450 \ M\Pi a$	Удаляется топлив- ный газ Td >Tcp	- < 250 MILe	Удаляется жид- кое топливо
BT-2a [41]	σ≥350 МПа	Удаляется топлив- ный газ Td >Tcp	6 ~ 550 MITa	ПОЛИСТИРОЛ: 31 К≥ Тіп >20 К (Рис. 2.24)

Таблица 2.19. Условия разгерметизации МК в зависимости от прочности оболочки.

Для оболочек из полистирола ($\sigma_{CH} = 100$ МПа), или материалов с еще более низкой прочностью, нет необходимости проводить специальные расчеты ($\sigma_{CH} < 350$ МПа, топливо находится в двухфазном состоянии "жидкость+пар"). Однако мы можем воспользоваться формулой $P_{ts} = 2 \sigma \delta_{sh}$ и рассчитать величину P_{ts} для определения оптимальной температуры T_{in} входа мишени в канал формирования. Для $\sigma_{CH} = 100$ МПа и оболочки ВТ-2 ($R_0 = 1044$ мкм, $\Delta R = 3$ мкм) внутреннее давление разрушения составляет всего лишь ~ 5.7 атм, а для оболочки ВТ-2a ($R_0 = 1020$ мкм, $\Delta R = 3$ мкм) ~ 5.9 атм. В этом случае для дейтерия температура разгерметизации будет составлять $T_d = 31.1$ К, так как давление топлива внутри мишени при данной температуре равно 5.35 атм, что ниже величины P_{ts} как для ВТ-2, так и для ВТ-2а (см. Рис. 2.23). При этом оптимальная температура входа мишени в канал формирования $T_{in} = 31.0$ К, т.е. порядка T_d , чтобы реализовать максимальное время для симметризации слоя.

Что касается DT топлива, то мы не располагаем справочными данными по давлению в диапазоне температур 39÷20 К (или двухфазной области "жидкость+пар" при $T_{tp} < T_d < T_s$). Поэтому вопрос о величинах T_d и T_{in} остается открытым до момента получения более полной информации по свойствам DT.



Рис. 2.21. Зависимость давления внутри оболочки от плотности дейтерия при криогенных температурах.



Рис. 2.22. Условия разгерметизации МК для различной прочности и толщины оболочки (данные для разработки дизайна мишени).



Рис. 2.23. Возможные фазовые состояния топлива в момент начала формирования слоя (T-S диаграмма для мишени BT-2).



Рис. 2.24. Динамика газовой полости при понижении температуры мишени.

Температура T_{in} играет важную роль, так как определяет динамику газовой полости при понижении температуры мишени. В работе были проведены расчеты отношения $R_{vb}/R_0(R_{vb} -$ радиус газовой полости, R_0 – внутренний радиус оболочки) для двух значений параметра θ , которые ограничивают изохору формирования по плотности D₂.

Напомним, что параметр θ определяется следующим образом $\theta = \rho_f / \rho_{cp}$, где ρ_f плотность газа при заполнении оболочки, а ρ_{cp} величина критической плотности для заданного топливного вещества. Для D₂ и BT-2 $\rho_f = 97.0$ мг/см³ и $\theta_{BT-2} = 1.468$, а для D₂ и BT-2a $\rho_f = 86.82$ мг/см³ и $\theta_{BT-2a} = 1.237$.

Результаты расчетов отношения R_{vb}/R_0 представлены на Рис.2.24. Хорошо видно, что при температурах ниже 31К динамика газовой полости выходит на линейный режим для большого диапазона изменения параметра θ : 1.237 < θ_{BT-2} и θ_{BT-2a} < 1.468, что включает обе мишени ВТ-2 и ВТ-2а. Этот факт может играть важную роль для динамической симметризации слоя, обусловленной движением мишени в процессе FST- формирования криогенного слоя топлива [16,23].

3.3. Формирование топливного слоя по методу FST

Одним из важнейших аспектов деятельности явилось проведение сравнительных расчетов по времени формирования топливного льда как в однослойной полимерной оболочке BT-2, так в двухслойной пористой оболочке BT-2a. При этом рассматриваются оба вида топлива: дейтерий (D2) и дейтерий-тритиевая смесь (DT).

Для расчета времени формирования методом FST необходимо знание следующих параметров мишени:

■ Прочностные свойства оболочки

- модуль Юнга (для расчета геометрического пятна контакта)

 прочность оболочки на растяжение (для расчета температуры разгерметизации и начальной температуры входа мишени в канал формирования)

■ Теплофизические свойства оболочки

 теплопроводность и теплоемкость (для расчета теплового пятна контакта и времени остывания оболочки)

■ Теплофизические свойства топлива (для расчета времени формирования слоя).

В проекте МНТЦ № 3927 рассматриваются три различных материала оболочки: полиимид, полистирол и GDP-полимер. Однако, необходимый набор параметров (Приложение 1) имеется только для полистирола (табличные данные теплопроводности и теплоемкости и собственные данные по измерению прочности при комнатных и низких температурах). Поэтому, при расчете времени формирования ограничимся рассмотрением пары "оболочка – топливо" в виде "полистирол – дейтерий" и "полистирол – DT смесь".

На основании полученных данных по расчету эффективному пятну контакта (см. Приложения 2 и 3), проведена оптимизация программы "Rapid_FST". Определено значение оптимальной температуры входа мишени в канал формирования $T_{in} = 31$ К (см. детали в §3.2 для BT-2 и BT-2a). Рассчитано полное время формирования мишеней и определена длительность каждой отдельной стадии.

При проведении расчетов использовалось программное обеспечение COMSOL Multiphysics для решения уравнений в частных производных как стационарных, так и зависящих от времени. Расчеты выполнены для случаев D₂ и DT топлива. При этом, прежде всего, были определены следующие величины для BT-2 и BT-2a:

- $-V_{cl}$ объем твердого топлива, мм³;
- *m_{cl}* масса твердого топлива, мкг;
- $-V_v$ объем топливного пара в полости мишени, мм³;
- m_v масса топливного пара, мкг;
- $-\rho_f$ плотность газообразного топлива в мишени при 300 К, мг/см³;
- *P_f* давление заполнения мишени газообразным топливом при 300 К, атм;
- *M*_f полная масса топлива, мкг.

Полученные результаты представлены в Таблице 2.20 для ВТ-2 и в Таблице 2.21 для ВТ-2а. Сравнительные данные по геометрии мишеней ВТ-2 и ВТ-2а, использованные в этих расчетах, даны в Таблицах 2.16 и 2.17.

Таблица 2.20. Параметры топливного слоя мишени ВТ-2.

Топливо	V _{cl}	m _{cl}	V_{v}	m _v	$ ho_f$	P_f	M_{f}
D_2	2.34	461.07	2.42	1.08	97.01	986.15	462.15
DT	2.34	593.04	2.42	0.24	124.54	1036.14	593.28

Параметры	D ₂	DT
Масса топлива (мкг)	371.20	488.58
– в пористом слое (мкг)	134.95	185.84
– в топливном слое (мкг)	235.18	302.50
– в полости мишени (мкг)	1.07	0.24
Плотность заполнения (мг/ см ³)	86.82	112.99
Давление заполнения (атм)	811.50	868.49

Таблица 2.21. Параметры топливного слоя мишени ВТ-2а.

3.3.1. Особенности перехода к DT топливу

Для мишеней класса HiPER при использовании D₂ топлива нет каких-либо специальных требований на величину плотности пара в полости мишени. Однако при переходе к DT топливу появляется необходимость включить в рассмотрение третью стадию, т.е. стадию охлаждение мишени до $T_{cool} = 16.3$ K, поскольку плотность пара в полости мишени должна составлять 0.1мг/см³ [59].

Выпишем данные для однослойных оболочек типа ВТ-2, подчеркивая разницу в их параметрах при заполнении DT или D₂ топливом.

- Однослойная оболочка заполненная DT топливом
- Внешний радиус DT-слоя: 1.044 мм
- Внутренний радиус DT-слоя: 0.833 мм
- Плотность пара: 0.1мг/см³ (<u>при температуре ниже тройной точки:</u> T = 16.3K < T_{tp})
- Плотность твердого DT: 253 мг/см³
- ▶ <u>Однослойная оболочка заполненная D₂ топливом</u>
- Внешний радиус D₂-слоя: 1.044 мм
- Внутренний радиус D₂-слоя: 0.833 мм
- Плотность пара: 0.448 мг/см³ (<u>при температуре тройной точки</u> T_{tp})
- Плотность твердого D₂: 196.697 мг/см³

Таким образом, для DT топлива в окончательном варианте имеем три стадии процесса, которые должны быть включены в интегральный расчетный код:

- Первая стадия охлаждение мишени от температуры T_{in} до температуры T_{tp} (τ_{liquid}).
- Вторая стадия вымораживание слоя при температуре тройной точки T_{tp} (τ_{solid})
- Третья стадия охлаждение мишени от температуры тройной точки *Т*_{tp} до температуры

 T_{cool} , поскольку это оговорено в требованиях на мишень (τ_{cool}).

В этом случае полное время формирования τ_{form} запишется в следующем виде

$$\tau_{form} = \tau_{liquid} + \tau_{solid} + \tau_{cool}$$
.

Результаты расчетов представлены в Таблицах 2.22 – 2.25. Необходимые комментарии выпишем ниже:

1) Мы уже отмечали, что в литературе отсутствуют данные по теплопроводности DT смеси в диапазоне температур 39÷20 К. Однако, как было показано в § 2, для DT топлива можно использовать оценки, которые дают времена, близкие к времени формирования для дейтерия.

2) Кроме того, при расчете времени формирования для мишени ВТ-2а существуют особенности, обусловленные дизайном самой мишени (наличие слоя "полимерная пена + DT"). Мы обсудим их ниже в §3.3.2.

3) Есть еще один фактор, который нельзя не учитывать. Это влияние дополнительного источника нагрева (собственный бета-распад трития) на время формирования мишени. На этом вопросе мы остановимся в §3.3.3.

4) В случае D_2 топлива расчеты проводились для двух значений начальной температуры T_{in} : 31 К и 37 К. Реализация значения 37 К технологически возможна только при использовании более прочных оболочек, чем полистирол. Отметим, что переход на такие оболочки представляет значительный интерес для будущих исследований, так как позволит экспериментально обеспечить максимальное время для симметризации слоя.

ВТ-2 Е = 1 [ГПа] ∆R= 3 [мкм]	$ au_{liquid}$ T_{in} = 31 K	$ au_{solid}$ T_{tp} = 18.7 K	τ _{form}
Первая стадия	6.04 сек		
Вторая стадия		3.97 сек	10.01 сек
Третья стадия	Отсутствуют треб мишени	бования на плотност	ть пара в полости
BT-2 E = 1 [ГПа] ΔR= 3 [мкм]	$ au_{liquid}$ T_{in} = 37 K	$ au_{solid}$ T_{tp} = 18.7 K	$ au_{form}$
ВТ-2 Е = 1 [ГПа] ΔR= 3 [мкм] Первая стадия	$ au_{liquid}$ $T_{in} = 37 \ K$ 9.8 сек	$ au_{solid}$ T_{lp} = 18.7 K	$ au_{form}$
BT-2 E = 1 [ГПа] ΔR= 3 [мкм] Первая стадия Вторая стадия	$ au_{liquid}$ $T_{in} = 37 \ K$ 9.8 сек	τ_{solid} T_{tp} = 18.7 К 3.97 сек	τ _{form} 13.77 сек

Таблица 2.22. Время формирования мишени ВТ-2 (полистирол – дейтерий).

Таблица 2.23. Время формирования мишени ВТ-2 (полистирол – DT смесь).

BT-2 E = 1 [ГПа] ΔR= 3 [мкм]	$ au_{solid}$ T_{tp} = 19.7 K	$ au_{cool}$ $T_{cool} = 16.3 \mathrm{K}$	$ au_{form}$		
Первая стадия	Отсутствуют данные по теплопроводности DT топлива в диапазоне температур 39÷20 К				
Вторая стадия	4.38 сек	1	21		
Третья стадия		1.42 сек	6.8 сек		

BT-2a E = 1 [ГПа] ΔR= 3 [мкм]	$ au_{liquid}$ $T_{in} = 31 \ { m K}$	$ au_{solid}$ T_{tp} = 18.7 K	$ au_{form}$
Первая стадия	4.3 сек		
Вторая стадия		2.73 сек	7.03 сек
Третья стадия	Отсутствуют	требования и	на плотность пара в
DT 2a			
Б1-2а E = 1 [ГПа] ΔR= 3 [мкм]	$ au_{liquid}$ $T_{in} = 37 \ { m K}$	$ au_{solid}$ T_{tp} = 18.7 K	$ au_{form}$
Б I - 2а E = 1 [ГПа] ΔR= 3 [мкм] Первая стадия	$ au_{liquid}$ $T_{in} = 37 \ { m K}$ 6.95 сек	$ au_{solid}$ T_{tp} = 18.7 K	$ au_{form}$
B1-2a E = 1 [ГПа] ΔR= 3 [мкм] Первая стадия Вторая стадия	$ au_{liquid}$ $T_{in} = 37 \text{ K}$ 6.95 cek	τ_{solid} $T_{tp} = 18.7 \ K$ 2.73 сек	τ _{form} 9.68сек

Таблица 2.25. Время формирования мишени ВТ-2а (полистирол – DT смесь).

BT-2а E = 1 [ГПа] ΔR= 3 [мкм]	$ au_{solid}$ $ au_{tp}$ = 19.7 K	$ au_{cool}$ $T_{cool} = 16.3 { m K}$	* τ _{form}
Первая стадия	Отсутствуют данные по теплопроводности DT		
	топлива в диапазоне температур 39÷20 К		
Вторая стадия	2.57 сек		
Третья стадия		0.84 сек	3.41 сек
3.3.2. Формирование слоя в мишени класса HiPER с оболочкой, состоящей из двух слоев: внешнего компактного полимерного слоя и внутреннего пористого полимерного слоя

Данный раздел начнем с конструктивных особенностей оболочки типа BT-2a, состоящей из внешнего компактного полимерного слоя и внутреннего пористого полимерного слоя:

- в пористом слое оболочки ВТ-2а рассматривается вариант только открытых пор,
- рассматриваются поры диаметром от 1 до 10 мкм; отношение толщины стенки пор к диаметру рассматривается равным 0.1,
- внешний (компактный) и внутренний (пористый) слои оболочки ВТ-2а не связаны (не склеены) друг с другом.

При расчете времени формирования мишени [41] мы должны убедиться, что эффективная теплопроводность слоя "полимерная пена + DT (D_2) " уменьшается незначительно. При этом учтем, что теплопроводность изотопов водорода для любых фазовых состояний значительно больше теплопроводности полистирола. Учтем также и то, что мишень при ее движении по каналу формирования вращается, и топливо внутри оболочки перемешивается.

Эффективная теплопроводность может быть оценена из уравнения *Clausius-Mossotti*. Для двухфазной системы с объемными концентрациями q и $\psi = (1 - q)$, считая, что форма включений такова, что в среднем смесь может считаться изотропной, имеем:

$$k_{ef} = k_f \cdot \frac{1 - \mu q}{1 + \mu q} \qquad \mu = \frac{k_f - k_p}{k_f + k_p}$$

Здесь k_f и k_p - теплопроводности топлива и полистирола, соответственно, q – концентрация полистирола. Для значений параметров $k_p/k_f = 0.1$, q = 0.2 получим $k_{ef}/k_f = 0.72$.

Оценка эффективной теплопроводности может быть проведена более аккуратно, рассматривая возможную форму включений. Известно, что поры открыты, имеют диаметр от 1 до 10 микрон и отношение толщины стенки к диаметру составляет 0.1. Следовательно, можно предположить, что поры имеют цилиндрическую форму и хаотически расположены внутри топливного конденсата. В этом случае можно использовать приближение Рэлея (*Raleigh*) для эффективной теплопроводности. Локальная компонента $k_{ef||}$ в направлении оси цилиндра определяется как:

$$\frac{k_{ef\parallel}}{k_f} = 1 + q \frac{k_p - k_f}{k_f}$$

А в перпендикулярном направлении как:

$$\frac{k_{ef\perp}}{k_f} = 1 + \frac{2q}{\frac{k_p + k_f}{k_p - k_f} - q}$$

В случае произвольно ориентированных цилиндров, усредненное значение определяется из выражения

$$\frac{k_{ef}}{k_f} = 1 + q \left(\frac{1}{3} \frac{k_p - k_f}{k_f} + \frac{2}{3} \frac{2}{\frac{k_p + k_f}{k_p - k_f}} - \psi \right)$$

Рассматривая те же значения параметров $k_p / k_f = 0.1$ и q = 0.2, эффективная теплопроводность равна

$$\frac{k_{ef}}{k_f} = 0.75$$

Мы видим, что оба предположения для конфигурации пор (произвольная форма и цилиндрическая форма) дают близкие значения и показывают, что условие $k_{ef}\rangle\rangle k_p$ по-прежнему выполняется. Другими словами, модель, в которой пренебрегается распределением температуры в топливном слое, может быть использована для расчета времени формирования мишени при наличии пористого слоя (BT-2a). Нам лишь необходимо определить соответствующие объемы жидкой m_l и газообразной m_v фазы топлива:

$$m_{\nu} = \frac{4\pi}{3} R_{1}^{3} \left(1 - \frac{W_{1}}{R_{1}}\right)^{3} \rho_{\nu} = \frac{4\pi}{3} R_{1}^{3} \alpha \rho_{\nu} ,$$
$$m_{l} = \frac{4\pi}{3} R_{1}^{3} \left(1 - \left(1 - \frac{W_{1}}{R_{1}}\right)^{3} + \psi \beta\right) \rho_{l} = \frac{4\pi}{3} R_{1}^{3} \left(1 - \alpha + \psi \beta\right) \rho_{\nu} .$$

Полученные соотношения были использованы для проведения расчетов по формированию топливного льда в двухслойной пористой оболочке (см. Таблицы 2.24 и 2.25).

Резюме. Анализ сравнительных расчетов по времени вымораживания топливного льда как в однослойной полимерной оболочке BT-2, так в двухслойной пористой оболочке BT-2а показал возможность формирования мишеней данного класса по методу FST за время, которое не превосходит 15 сек как для D2, так и DT топлива даже для температуры $T_{in} = 37$ K (Таблицы 2.22 и 2.24). При этом, конечно, необходимо, чтобы время качения мишени (время пребывания мишени в канале формирования) было больше, нежели время формирования: $\tau_{form} \leq \tau_{res}$. Результаты, полученные в работах [41-43] для спиральной геометрии канала, показали, что величина τ_{res} может достигать ~ 25 сек, что позволяет осуществлять широкий класс экспериментов с мишенями различного дизайна (включая и реакторные, см. § 4), реализуя их движение в одном и том же модуле формирования (см. также Приложение 6).

Еще один вывод. При сравнении данных для двух типов мишени, необходимо различать отток тепла через плотную оболочку и через пористый слой. Если концентрация пор большая (порядка 80% и более), то теплопроводность пористого слоя в основном определяется теплопроводностью топлива. В этом случае градиент температуры, и соответственно отток тепла через пятно контакта, определяется по-прежнему характерными параметрами первой оболочки из компактного полимера. Таким образом, наличие пористого слоя в оболочке не оказывает существенного влияния на времена охлаждения мишени, но с другой стороны, его наличие в дизайне мишени безусловно перспективно, поскольку упрощает достижение тре-буемой симметризации жидкого криогенного топлива.

Мы также подчеркиваем следующие два обстоятельства, важные для будущих разработок по оптимизации FST-MФ-HiPER [41-43]:

■ Выбор материалов является ключевым моментом для минимизации рисков при частотном производстве мишеней, особенно при использовании в качестве топлива радиоактивной DT смеси.

■ В перспективе необходимо исследовать вопрос об использовании комбинированного канала формирования, чтобы увеличить время пребывания в нем мишени *τ_{res}*, и снизить риски при инжекции мишени в тестовую камеру (см. §3.3.4).

3.3.3. Влияние дополнительного источника нагрева (собственный бета-распад трития) на время формирования мишени

В данном разделе мы рассмотрим вопрос, касающийся влияния на расчеты дополнительного источника нагрева за счет бета-распада трития [69,70] (период полураспада $T_{1/2}$ = 12,33 года; максимальная энергия – 18,61 кэВ, средняя энергия – 5,54 кэВ).

Итак, при охлаждении мишени существует постоянный источник нагрева мишени – собственный бета-распад трития, содержащегося в составе DT смеси. Оценим его влияние на результаты, представленные в Таблицах 2.23 и 2.25.

Закон радиоактивного превращения весьма прост. Для каждого радиоактивного ядра имеется определенная вероятность λ того, что оно испытывает превращение в единицу времени. Следовательно, если радиоактивное вещество содержит N атомов, то количество атомов dN, которое претерпит превращение за время dT, будет равно

$$dN = -\lambda N dt$$

Вероятность распада λ входит в это уравнение в качестве коэффициента, который называется *постоянной распада*. Знак минус соответствует убыванию вещества в процессе распада. Решив уравнение, найдем закон изменения числа радиоактивных ядер со временем:

$$N = N_0 \exp(-\lambda t),$$

где N_0 – число атомов вещества до начала распада. Если в полученное уравнение подставить вместо времени *t* период полураспада $T_{1/2}$, то можно найти связь постоянной распада λ с пе-

риодом полураспада $T_{1/2}$. Действительно, так как справедливо следующее соотношение $N(T_{1/2}) = N_0/2$, то $N_0 \exp(-\lambda T_{1/2}) = N_0/2$ и $\exp(-\lambda T_{1/2}) = 1/2$. Отсюда несложно получить искомую величину $\lambda = \ln 2/T_{1/2} \approx 0.69/T_{1/2}$. С учетом этого, уравнение $N = N_0 \exp(-\lambda t)$ можно переписать в форме, удобной для проведения последующих оценок:

$$N = N_0 \exp\left(-\frac{\ln 2}{T_{1/2}}t\right),$$

где N_0 – начальное число атомов трития. Поскольку период полураспада $T_{1/2}$ = 12,33 года, а время FST- формирования составляет десятки 10 секунд (т.е. $N \sim N_0$), то число распадов в единицу времени можно записать в следующем виде:

$$\frac{dN}{dt} = -\frac{N_0 \ln 2}{T_{1/2}}$$

Выделяемая при этом мощность P_{β} равна:

$$\left\langle P_{\beta} \right\rangle = \frac{N_0 \ln 2}{T_{1/2}} \left\langle E_{decay} \right\rangle,$$

где E_{decay} – энергия распада. Максимальное значение этой энергии составляет 18.6 кэВ. Среднее значение – 5.5 кэВ.

Величину $\langle P_{\beta} \rangle$ можно сравнить с мощностью оттока тепла за счет контакта мишени с холодными стенками канала формирования $\langle Q_{out} \rangle$. Для мишеней ВТ-2 и ВТ-2а и DT топлива (состав равновесной топливной смеси: 50% молекул DT, 25% трития и 25% дейтерия) величина отношения $\langle P_{\beta} \rangle / \langle Q_{out} \rangle$ приведена в Таблице 2.26 [41].

Таблица 2.26. Влияние бета-распада трития на время формирования мишени методом FST.

Мишень	$\left\langle P_{\beta}\right\rangle$	$\langle Q_{\scriptscriptstyle out} angle$	$\langle P_{\beta} \rangle / \langle Q_{out} \rangle$
BT-2	110мкВт	5850 мкВт	0.018
BT-2a	70 мкВт	5620 мкВт	0.012

Резюме. При проведении оценок влияния дополнительного источника нагрева на время FST- формирования мишени (нагрев возникает за счет собственного бета-распада трития, находящегося в топливной смеси), мы исходили из того, что поглощается все выделяющееся тепло (реальное поглощение, безусловно, меньше). Поэтому, полученная в этих предположениях величина $\langle P_{\beta} \rangle / \langle Q_{out} \rangle < 2\%$ означает, что рассматриваемый источник теплопритока может не учитываться при производстве мишеней по методу FST.

3.3.4. Устойчивость мишеней класса HiPER при их инжекции в тестовую камеру

При переходе к DT топливу критическим является вопрос, связанный с устойчивостью оболочки при ударе применительно к процессу инжекции мишеней класса HiPER в оптическую тестовую камеру.

В работе [44] мы подчеркивали, что в этом вопросе важным моментом является разработка физически состоятельного критерия потери устойчивости оболочки при действии осевого давления. Обсуждался вариант, когда имеется локальное и кратковременное превышение нагрузки в точке или малой области внутреннего хрупкого криогенного слоя, окруженного внешним, прочным слоем (полимерная оболочка). Этот внешний прочный слой может служить защитой для внутреннего слоя. И это будет в том случае, когда внешняя оболочка будет устойчива к перегрузкам в процессе удара. Для анализа этого явления используем результаты, полученные в работе Ландау и Лифшица [87] для очень тонких высокоаспектных оболочек ($\Delta R \ll R$). Максимальная скорость, с которой мишень может упасть на подложку и не разрушиться, определяется соотношением

$$V_{\rm lim} = \frac{R^{2.5} \sigma^{1.5}}{2kE\Delta R\sqrt{m}}, \quad k = 1.2(1 - \nu_p^2)^{-3/4}$$

где R и ΔR – радиус и толщина оболочки, v_p - коэффициент Пуассона, σ – предельное напряжение при растяжении, изгибе или сжатии, E – модуль Юнга, m – масса мишени.

Проведем расчеты для высокоаспектных оболочек из полистирола типа BT-2 и BT-2а. Данные для расчетов представлены в Таблицах 2.27 и 2.28. Сделаем оценки для наименьшего значения $\sigma = 30$ МПа и наибольшей массы мишени m = 655 мкг (BT-2a). Значение предельной скорости в этом случае составит ~ 6.8 м/сек (см. Таблицу 2.29). Учитывая, что результат получен для очень тонких оболочек, а с увеличением их толщины деформации могут иметь иной характер, то можно лишь заключить, что величина V_{lim} будет порядка нескольких м/сек, что соответствует экспериментам с ПАМС оболочками (см. Таблицу 2.29 и Диаграмму 4).

1'	аблица	2.27.	Параме	гтры	BT-2	u B	T-2a.
----	--------	-------	--------	------	------	-----	-------

Мишень ВТ-2 (DT – полистирол)			
Масса мишени [мкг]	636.53		
Масса оболочки [мкг]	43.25		
Масса топлива [мкг]	593.28		
Плотность заполнения [мг/ см ³]	124.54		
Мишень BT-2а (DT – полисти	ирол)		
Масса мишени [мкг]	654.66		
Масса оболочки [мкг]	166.08		
– компактный полимер [мкг]	41.28		
– пористый полимер [мкг]	124.79		
Масса топлива [мкг]	488.58		
– в пористом слое [мкг]	185.84		
– в топливном слое [мкг]	302.50		
– в полости мишени [мкг]	0.24		
Плотность заполнения [мг/ см ³]	112.99		

Таблица 2.28. Свойства полистирола.

Разрушающее напряжение	Единицы измерения (МПа)
Растяжение	30-40
Изгиб	55-70
Сжатие	80-100

Таблица 2.29.	Допустимая	скорость	мишени.
---------------	------------	----------	---------

Тип исследуемой оболочки класса HiPER	ВТ-2а, поли- стирол (расчет)	Оболочка ПАМС (эксп.)
Аспектное	349	46.5
отношение		
ΔR (мкм)	3	20
$V_{ m lim}$, м/сек	6.8	> 3.43*

*/Скорость падения оболочки с высоты 60см [46] (см. также Диаграмму 4) **Резюме.** В процессе транспорта мишени с помощью инжекции, наибольшие перегрузки возникают при ее приземлении в тестовой камере. Чтобы выполнить технические требования по снижению рисков, связанных с разрушением мишени, необходимо определить максимальную скорость, с которой мишень может упасть на подложку и не разрушиться. Проведенные исследования показали, что внешняя полимерная оболочка может служить защитой для внутреннего хрупкого слоя топлива. Это означает, что мишень класса HiPER будет иметь высокую устойчивость при скоростном ударе. Эти выводы находятся в хорошем согласии с нашими экспериментальными исследованиями по устойчивости ПАМС оболочек при действии осевого давления, возникающего при их инжекции в тестовую камеру [46].

3.4. Модуль формирования для мишеней класса HiPER

В окончательном варианте работа лазерной установки класса HiPER потребует формирования и доставки криогенных топливных мишеней с частотой $v \ge 1$ Гц при энергии лазера $E_l \sim 200$ кДж [40,59]. Для этого случая в проекте МНТЦ № 3927 разработана концепция нового модуля формирования (МФ), работающего в частотном режиме по принципу FST и позволяющего формировать криогенный слой топлива внутри движущихся бесподвесных мишеней диаметром $\emptyset \sim 2$ мм. Геометрия канала формирования должна (КФ) быть такова, чтобы время качения мишени (время пребывания в канале формирования) было больше, нежели расчетное время формирования мишени.

Для мишеней любого класса важнейшим направлением исследований является деятельность по оптимизации условий работы МФ, включая упрощение конструкции и внесение поправок в спецификации. В Приложении 6 "Геометрия канала формирования для мишеней класса HiPER" мы рассмотрели вопрос, касающийся оптимизации КФ в виде одиночной спирали. При проведении расчетов варьировались следующие параметры FST эксперимента: толщина стенки оболочки и прочностные характеристики материала оболочки; коэффициенты трения скольжения и качения; геометрия КФ (угол захода спирали, ее общая длина, высота и диаметр). Показано, что величина τ_{res} может достигать ~ 25 сек, что позволяет осуществлять широкий класс экспериментов с мишенями различного дизайна.

В Приложении 7 "Конструирование FST- модуля для поточного производства криогенных мишеней класса HiPER" [41] представлены результаты по эскизному проектированию МФ, описана функциональная схема МФ, дан перечень основных и интерфейсных (промежуточных) узлов МФ.

На Рис.2.25 показаны макеты каналов формирования, представляющие собой уже двойную спираль [48,49], для проведения FST- экспериментов с мишенями двух и более миллиметрового диаметра, включая и мишени реакторного класса (см. § 4).

Таким образом, в результате проведенных исследований Группой Криогенных Мишеней ФИАН был приобретен уникальный опыт по разработке и проектированию одного из основных элементов фабрики мишеней – модуля формирования, предназначенного для непрерывного пополнения топливом экспериментов на мощных термоядерных установках. Этот опыт будет использован при конструировании аналогичного устройства следующего поколения – прототипа фабрики мишеней реакторного класса. ДИАГРАММА 4. Совет Научно-Технических Ресурсов (Великобритания) поставил в ФИАН 100 оболочек ПАМС для проведения работ в рамках проекта HiPER.



■ Оболочки из материала ПАМС (поли-альфа-метил-стирол), поставки которых в ФИАН осуществлены по проекту HiPER.



■ Опытный образец МК, разработанный для проекта HiPER: (а) общий вид в сборке; (б) детали МК.



■ Проброс оболочек из материала ПАМС в вертикальном вакуумном канале: (а) схема эксперимента, (б) высота проброса, (в) оболочка после падения с высоты 60 см (позиция 2, повреждения отсутствуют).



Puc. 2.25. Макеты каналов формирования для проведения FST- экспериментов с мишенями $\emptyset \ge 2$ мм Параметры каналов: Ω – число витков; L, X – длина спирали и хвостовиков; L – ширина двойной спирали: №2: медная трубка (\emptyset 6 x 1 мм) \rightarrow Ω =23.5 \rightarrow \emptyset 36 мм \rightarrow l=72 мм; L = 360 мм \rightarrow X1= 70 мм \rightarrow X2 = 95 мм; №3: медная трубка (\emptyset 6 x 1 мм) \rightarrow Ω =22 \rightarrow \emptyset 39 мм \rightarrow l=78 мм; L = 440 мм \rightarrow X1= 100 мм \rightarrow X2 = 83мм.

3.5. Резюме: результаты экспертного анализа для мишеней класса HiPER

В работе проведен экспертный анализ возможности формирования мишеней класса HiPER методом FST. Полученные результаты были использованы при дизайне модуля формирования для мишеней указанного типа (FST-MФ-HiPER). В процессе анализа мы учитывали возможность его работы не только как автономного устройства, но и как интегральной части установки по частотному производству мишеней, их сборки со специальным носителем и инжекционной доставке в лазерный фокус [41]. Конструкция должна быть совместима с устройством высокочастотной сборки 100 ансамблей *«криогенная мишень + сабот»* и подачи этих сборочных единиц на стартовую позицию в инжектор (см. Приложение 7).

Подчеркнем, что наиболее важный аспект теоретической деятельности – это создание вычислительного кода "*Target Production Scheme Code*" (TPS код) [41] для проведения оптимизационных расчетов замкнутого цикла FST-формирования: заполнение оболочек топливом – формирование слоя – инжекция готовой мишени. Данные TPS кода позволяют осуществить конструирование FST-МФ-HiPER и планирование экспериментов при требуемой вариации условий. При проведении расчетов использовались следующие входные параметры:

(1) Начальная конфигурация мишеней класса HiPER,

(2) Сводная информация по свойствам материалов,

(3) Тепловой режим FST- цикла,

(4) Инжекционный режим FST- цикла.

Основной результат данной деятельности – это расчет оптимизационных параметров FST- цикла для специализированного модуля высокочастотного формирования криогенных мишеней класса HiPER (см. Таблицу 2.30).

Таблица 2.30. Зн	начение оптимизаиионных па	раметров (ОП) FST- иикла	для мишеней І	BT-2 u BT	-2a.
,	,		/ /			

ОП для разработки технических требований на	BT-2	BT-2a
FST-MΦ-HiPER	(D ₂ - Полистирол)	(D ₂ - Полистирол)
• Требуемая плотность заполнения	97.01 мг/см ³	86.82 мг/см ³
• Требуемое давление заполнения при 300 К	986.15 атм	811.50 атм
 Допустимый перепад давления на стенке 	0.29 атм	0.31 атм
оболочки		
• Время заполнения	34.8 час	35.94 час
• Скорость заполнения	0.24-0.8 атм/мин	0.2-0.6 атм/мин
• Температура разделения топлива на жидкую	37.4 К	~ 38 K
и газообразную фазы <i>Т</i> _s		
• Температура разгерметизации <i>T_d</i>	31.1 К	31.5 К
• Давление топлива внутри мишени при <i>T_d</i>	5.35атм (давление	5.84 атм (давление
	разрушения ~ 5.7атм)	разрушения ~5.9 атм)
• Температура входа мишени в канал	31.0 К	31.0 К
формирования <i>T</i> _{in}		
• Давление топлива внутри мишени при <i>T_{in}</i>	5.34 атм	5.34 атм
 Время формирования 	10.01 сек	7.03 сек
	Угол захода спирали	Угол захода спирали
 Геометрия канала формирования (КФ) 	$= 5.7^{\circ}$, ее длина $= 55$	= 5.7°, ее длина = 55
	см, и высота =5.51 м	см, и высота = 5.51 м
• Время пребывания мишени в КФ	$\tau^{\max}_{res} \sim 25$ сек	$\tau^{\max}_{res} \sim 25 \text{ cek}$

Таким образом, результаты моделирования показывают перспективность применения FST- технологий в качестве научной и технологической базы для формирования криогенных мишеней класса HiPER. Результаты моделирования есть искомые практические рекомендации, которые обеспечивают оптимальные режимы работы всех стадий производства мишеней:

1) Стадия заполнения: реализуются режимы, при которых время заполнения оболочки минимально, возможность ее разрушения внешним и внутренним давлением исключена, а обратная утечка газа в процессе хранения или транспортировки оболочек между отдельными модулями системы отсутствует. Существующая в ФИАН система заполнения позволяет реализовать работу с массивом бесподвесных оболочек (как BT-2, так и BT-2a) и заполнить их до 1000 атм при комнатной темрературе.

2) Стадия формирования: анализ сравнительных расчетов по времени формирования топливного льда как в однослойной полимерной оболочке ВТ-2, так в двухслойной пористой оболочке ВТ-2а показал возможность производства мишеней данного класса по методу FST, причем время формирования не превосходит 15 сек как для D₂, так и DT топлива.

3) **Транспорт мишени**: экспериментальные и расчетные данные подтверждают высокую устойчивость при инжекционном транспорте бесподвесных мишеней класса HiPER между основными функциональными элементами системы: мишенный контейнер – модуль формирования – тестовая камера.

Некоторые другие результаты и рекомендации представлены в Таблице 2.31 с учетом данных Рис. 2.26 и 2.27.

Оболочки				
Материалы	• Выбор материалов: является ключевым моментом для минимизации рис-			
	ков при частотном производстве мишеней.			
	 Оболочка ВТ-2а: при концентрации пор ≥ 80% наличие пористого слоя не 			
Дизайн	оказывает существенного влияния на время FST- формирования мишени.			
	Между тем, такой слой способствует симметризации жидкого топлива.			
	Топливо			
	• Заполнение: при разработке эффективной схемы необходимо иметь досто-			
Влияние β-	верную информацию о влиянии бета- излучения на свойства используемых			
распада три-	полимеров. Это позволит либо учесть возникающие изменения, либо пе-			
тия в составе	рейти к рассмотрению других материалов в дизайне мишени.			
DT смеси	• Формирование: собственный бета-распад трития как дополнительный ис-			
	точник нагрева не влияет на время FST- формирования криогенного слоя.			
	Выживаемость топливного ядра			
	• Структуризация топлива крайне важна как для производства, так и достав-			
	ки криогенных мишеней (перспективно снижение размера зерна до нано			
Структури-	диапазона).			
зация	 Высокие скорости охлаждения (FST метод → 1÷50 К/с) в присутствии до- 			
топлива	бавок к топливу позволяют сформировать ультрадисперсные слои с повы-			
	шенной механической и тепловой устойчивостью.			
	 DT структуризация: Т₂ служит высокоплавкой добавкой к D₂. 			
	 Внешние защитные криогенные слои (Рис. 2.26) 			
Внешние ме-	 Инжекция мишени с защитной крышкой (Рис. 2.27) 			
тоды защиты	 Внешние защитные металлические слои различной конфигурации 			
мишени	(Рис. 2.26 (оболочка #1), 2.28 и 2.29)			
	 Нано покрытия с особыми свойствами (вопрос изучается) 			

Таблица 2.31. Результаты и рекомендации в рамках метода FST для мишеней класса HiPER.



(a) Две полимерные оболочки внутри вибратора до эксперимента. Оболочка #1 имеет покрытие из палладия (150 Å)



(б) После работы вибратора непрозрачный защитный криогенный слой равномерно покрывает каждую мишень

Рис. 2.26. Процедура нанесения защитного криогенного слоя внутри специального вибратора (Rotating and Bouncing cell или R&B cell)[28]. Эксперименты были выполнены следующим образом:

(a) в каждой оболочке содержится жидкий водород при T = 14.6 К. Снаружи в верхней части оболочек расположен кислородный снег (тройная точка для кислорода 54.3 К);

(б) после работы R&B ячейки в режиме подскока ("bouncing mode," см. Диаграмму 5) твердый кислород равномерно распределяется по внешней поверхности оболочек в виде защитного криогенного слоя. Отметим, что оболочка слева имеет слой палладия (150 Å), что крайне важно для формирования двойного защитного покрытия "металлический слой + криогенный слой".



Рис. 2.27. Инжекция мишени вместе с защитным экраном в камеру реактора (защитный экран предохраняет мишень от конвективного нагрева горячим остаточным газом [81]).



§ 4. Мишени реакторного класса

Формирование и доставка криогенных мишеней с высокой частотой является непременным условием построения фабрики топливных мишеней для обеспечения работы реактора по схеме ИТС. Одним из ключевых моментов при построении фабрики является переход к реакторным поточным технологиям, основанный на выборе эффективного метода формирования топливного слоя, и построение соответствующего устройства для частотного производства мишеней.

В ФИАН разработан метод формирования топливного слоя, основанный на работате с движущимися бесподвесными мишенями (метод FST). Это позволяет формировать криогенные мишени в непрерывном режиме или с необходимой частотой. В данном параграфе представлены результаты экспертного анализа, показывающие возможность применения метода FST в качестве научной и технологической базы для высокочастотного формирования криогенных мишеней реакторного класса.

4.1. Классические реакторные мишени с высоким энергетическим выходом

В настоящее время не существует общепринятой модели для мишеней реакторного класса. Поэтому начальной точкой нашего исследования будет модель, называемая классической мишенью с высоким энергетическим выходом или Classical High Gain Target (CHGT). Данная мишень представляет собой сферически симметричный слой DT/D2 топлива, намороженный на внутренней поверхности полимерной оболочки. Мы рассмотрим конфигурацию CHGT-1, предложенную в работе [61]. Она представляет собой оболочку из полистирола (CH) диаметром 4 мм и толщиной стенки 45 мкм. Толщина твердого слоя топлива в тройной точке составляет 200 мкм. Параметры мишени при T = 300 К даны в Таблице 2.32. Все расчеты проведены с использованием "*Target Production Scheme Code*" (TPS код).

Изо-	Плотность	Давление	Время	Скорость	Macca
то-	заполнения	заполнения	заполнения	заполнения	топлива
пы	(мг/см ³)	(атм)	(часы)	(атм/мин)	(мкг)
D ₂	54.73	415.10	7.18	0.6 - 1.3	1712.01
DT	69.58	423.80	8.09	0.6 - 1.3	2176.64

Таблица 2.32. Параметры мишени СНGТ-1 при комнатной температуре.

При анализе возможностей формирования CHGT-1 методом FST, мы учитывали также и то обстоятельство, что в дизайн мишени с необходимостью вносятся изменения, связанные с защитой мишени от теплового излучения при ее движении в камере реактора. Мы сделали предварительные расчеты времени охлаждения различных металлических покрытий (см. Рис. 2.28). Это время оказалось крайне небольшим – менее одной миллисекунды. Это означает что, охлаждаясь практически мгновенно, тонкий металлический слой (150÷ 200 Å) приводит к значительному расплыванию теплового пятна контакта, и как следствие, к уменьшению времени формирования твердого слоя топлива на внутренней поверхности оболочки.

Соответствующие результаты расчетов приведены в Таблице 2.33. Отметим, что технология нанесения защитных слоев хорошо развита в ФИАН [71]. На Рис.2.29 представлена криогенная мишень с внешним покрытием платина/палладий (200 Ű).

Для сравнения в последней строке таблицы дано время формирования мишени, когда площадь пятна контакта полностью совпадает с площадью поверхности оболочки ($\chi_{eff} = 1.0$). Это минимально возможное время вымораживания слоя. Но при этом надо помнить, что при столь малых временах вряд ли удастся осуществить симметризацию топливного слоя.



Рис. 2.28. Время охлаждения различных металлических покрытий.



платина/палладий

Рис. 2.29. Мишень с покрытием \rightarrow внешний защитный слой: 200 Å Pt/Pd; диаметр полимерной оболочки: 2R = 1.5 мм; состав топлива: D₂ + 3%Ne; толщина криогенного слоя: 50 мкм.

Внешний защитный слой из металла позволяет:

■ реализовать требуемые скорости охлаждения мишени,

■ защитить мишень от теплового излучения стенок реактора при ее доставке (например, температура стенок камеры реактора "SOMBRERO" составляет T = 1758 K [75])

Таблица 2.33. Время FST- формирования для мишеней класса CHGT-1.

D ₂ топливо	Время формирования		
$\rho = 54.7 \text{ мг/см}^3$ P = 415.1 атм	**T = 37 K	**Т = 27 К	
* <i>χ_{eff}</i> = 1.8 10 ⁻³ (только СН оболочка)	227.5 сек	149.0 сек	
* χ_{eff} =3.0 10 ⁻² (СН оболочка + металлическое по- крытие)	13.65 сек	8.94 сек	
* $\chi_{eff} = 1.0$	0.38 сек	0.24 сек	

*/Эффективное пятно контакта χ_{eff} = геометрическое (χ_g) + тепловое (χ_t)

**/Т – температура мишени перед началом формирования слоя

Таким образом, расчеты показывают, что время формирования для мишени CHGT-1 с внешним металлическим покрытием не превышает 15 сек (см. Таблицу 2.33). Это означает, что модуль формирования, разработанный для мишеней проекта HiPER [41] (см. также Приложения 6 и 7), вполне может использоваться для начальных экспериментов по формированию реакторной мишени класса CHGT -1.

4.2. Критическая мишень

В данном разделе мы рассмотрим особенности формирования реакторных мишеней в случае, когда плотность топлива при заполнении оболочки равна плотности в критической точке $\rho_f = \rho_{cp}$, характеризующейся параметрами ρ_{cp} , P_{cp} , T_{cp} (см. Таблицу 2.34).

4.2.1. Мишень с твердым ультра дисперсным слоем топлива

В экспериментах по формированию слоя в ультрадисперсном состоянии (см. Приложение 4) была обнаружена корреляция между эффектом образования прозрачного слоя и протеканием процесса капельной конденсации в объеме оболочки, когда плотность заполнения близка к критической плотности для заданного топливного вещества. Это обстоятельство имеет особое значение для реакторной мишени класса CHGT-1, поскольку именно для нее плотности топлива при заполнении $\rho_f = 54.73 \text{ мг/см}^3$ (D₂) и $\rho_f = 69.58 \text{ мг/см}^3$ (DT) находятся вблизи критических значений, что следует из простого сравнения Таблиц 2.32 и 2.34.

Чтобы упростить дальнейший анализ, воспользуемся параметром $\theta = \rho_f / \rho_{cp}$, где ρ_f плотность газа при заполнении оболочки, а ρ_{cp} величина критической плотности для заданного топливного вещества (см. Таблицу 2.34).

Изотопы водорода	H ₂	D ₂	T ₂	DT смесь
$ ho_{cp}$, мг/см 3	30.1	69.8	108.97	87.06
<i>P_{cp}</i> , атм	12.98	16.43	18.26	17.5
<i>Т_{ср}</i> , к	33.19	38.34	40.44	39.42

Таблица 2.34. Критические параметры (плотность, давление и температура) для изотопов водорода и их смесей (см. Приложение 1).

Для критической мишени $\rho_f = \rho_{cp}$, и, следовательно, $\theta = 1$ (так называемая критическая мишень). Подчеркнем, что процессы, протекающие в критической точке, обладают определенным гистерезисом и могут наблюдаться также и вблизи критической точки при $\theta \sim 1$ (около критическая мишень). Например, Рис. 2.30 ($\theta = 0.91$, $\rho_f = 27.39$ мг/см³) и Рис. 2.31 ($\theta = 0.93$, $\rho_f = 27.99$ мг/см³) с очевидностью демонстрируют возникновение критической опалесценции при $\theta < 1$ (кадр 2). Теперь перейдем к более детальному рассмотрению экспериментов по охлаждению оболочки с водородом, представленных на Рис. 2.30. Нас будет интересовать поведение границы раздела "жидкость – пар" при $\theta \sim 1$, когда внутри нее реализуется процесс капельной конденсации в объеме. Оболочка из полистирола (Ø 940 мкм) заполнена H₂ при T = 300 K до давления P = 445 атм. Плотность H₂ близка к критической плотности. Изохора формирования соответствует θ = 0.91. Начальное фазовое состояние \rightarrow газ (кадр 1). Точность измерения температуры составляла 0.05 К. Отметим, что использование в этих экспериментах именно водорода обусловлено следующими факторами: 1) изучаемые явления не зависят от вида изотопа, 2) время заполнения оболочек водородом наименьшее по сравнению с другими изотопами, 3) водород – наиболее дешевый изотоп.

По мере быстрого охлаждения оболочки (q = 0.18 K/c), при переходе через критическую точку наблюдается явление капельной конденсации в объеме (причем с элементами критических явлений). Хорошо видна критическая опалесценция (кадр 2, мениск отсутствует), и последующее образование крупных пузырьков пара за счет слияния малых. Граница раздела фаз становится распределенной по всему объему и не имеет четкой формы и локализации (мениск отсутствует, кадры 2 и 3).



Рис.2.30. Капельная конденсация в объеме оболочки при ее охлаждении со скоростью q = 0.18 К/с ($P_f = 445$ атм при 300 К, $\rho_f = 27.39$ мг/см³, $\theta = 0.91$).



Рис.2.31. Капельная конденсация в объеме оболочки при ее охлаждении со скоростью q = 0.013 К/с $(P_f = 462 \text{ атм при } 300 \text{ K}, \rho_f = 27.99 \text{ мг/см}^3, \theta = 0.93).$

Чтобы понять такое поведение водорода, остановимся на свойствах вещества при $\theta \sim 1$, т.е. при $\rho \sim \rho_{cp}$. Переход между жидкостью и газом в критической точке относится к переходам высших порядков, т. е. переходам порядок – беспорядок, или критическим явлениям. Са-

мое интересное в таких явлениях – это кооперативный механизм, посредством которого образуется новая структура. Параметром порядка для системы "жидкость – газ" является плотность. Хорошо известно, что при приближении к критической точке плотности жидкости и газа сравниваются. При этом сама система характеризуется наличием долгоживущих флуктуаций плотности. При охлаждении системы она уходит от критического состояния именно в точках таких флуктуаций. Граница раздела фаз становится распределенной по всему объему и не имеет четкой формы и локализации. Данный процесс облегчает условия формирования высокодисперсных гомогенных сред и, в частности, формирование высокодисперсного слоя топлива в присутствии примесей. Это объясняется тем, что процесс капельной конденсации в объеме выполняет следующие функции:

(a) способствует равномерному распределению легирующей добавки по объему жидкого топлива (особенно важно для DT топлива, представляющего смесь нескольких компонентов D₂, DT и T₂, в которой тритий T₂ есть легирующий элемент),

(б) при отверждении топлива обеспечивает условия для массового роста дислокаций по всему объему слоя, что препятствует образованию крупно кристаллической фазы.

Полученные таким образом слои обладают повышенной механической и тепловой устойчивостью [35,36], что является важным фактором с точки зрения сохранения качества криогенного слоя при инжекции и транспорте мишени в фокус мощной лазерной установки.

Кратко сформулируем основные выводы:

■ Когда плотность топлива при заполнении оболочки близка к плотности в критической точке, то наличие капельной конденсация в объеме свидетельствует о том, что для данной плотности вещества, требуемые скорости охлаждения достигнуты, т.е. реализованы условия для формирования твердого слоя в ультрадисперсном состоянии. В этом случае капельная конденсация – строгий экспериментальный маркер готовности системы к FST- формированию слоя.

■ Наблюдается следующая закономерность: чем меньше плотность заполнения (давление заполнения) по сравнению с критическим значением, тем большие скорости охлаждения требуются для инициации процесса капельной конденсации в объеме (Рис. 2.30 и 2.31).

■ В случае, когда в веществе присутствуют легирующие добавки другого вещества с большей молекулярной массой (или мы имеем дело со смесью веществ → DT топливо), флуктуации плотности оказываются больше, и процесс капельной конденсации происходит при меньших скоростях охлаждения (добавки служат центрами конденсации). Эта закономерность наблюдалась нами экспериментально на смесях H₂+HD и D₂+Ne (работа выполнена в рамках проекта МАГАТЭ №13871). Кроме того, капельная конденсация в объеме способствует равномерному распределению добавок по всему объему жидкого топлива, что при вымораживании слоя обеспечивают условия для массового роста дислокаций и позволяет стабилизировать метастабильное ультрадисперсное состояние топлива, получаемое при быстром охлаждении мишени.

■ Еще один фактор, который будет влиять на скорость охлаждения — это энергичное перемешивание топлива при качении мишени по каналу формирования, которое способствует интенсификации конвективного массопереноса и, тем самым, также уменьшает требуемые скорости охлаждения при практической реализации метода FST.

Фактически, применительно к задачам ИТС, метод FST обеспечивает получение новых функциональных материалов, обладающих оптимальной микроструктурой для формирования криогенных слоев топлива требуемого качества. Условия формирования – высокие скорости охлаждения (q = 1÷50 K/c) и высокоплавкие добавки к топливу для стабилизации неравновесной фазы. При плотностях, близких к критической, необходимые скорости охлаждения снижаются до величин порядка q = $0.2\div0.01$ K/c (см. Приложение 4), что дает определенную свободу при разработке технологии формирования реакторных мишеней.

Основные преимущества ультрадисперсного слоя перед крупно кристаллической фазой топлива можно сформулировать следующим образом:

I. Изотропность слоя, обеспечение требуемого качества поверхности слоя, повышенная механическая и тепловая устойчивость слоя при производстве и доставке мишеней;

II. Реализация высоких скоростей охлаждения → малое время формирования → минимизация трития в мишенной системе;

III. Осуществление формирования слоя в движущихся мишенях \rightarrow частотность производства \rightarrow минимизация стоимости производства в расчете на одну мишень \rightarrow перспектива применения в реакторах ИТС.

4.2.2. Мишень с топливом, находящимся в критическом состоянии

Если плотность топливного вещества внутри оболочки близка к критической плотности, то существует еще одна возможность получить принципиально новый тип мишени, который может использоваться в исследованиях по ИТС [7,49]. В отличие от традиционной мишени, представляющей собой сферическую полимерную оболочку с вымороженным на ее внутренней поверхности твердым топливным слоем (криогенный слой), предлагается использовать полимерную оболочку, содержащую топливо непосредственно в критическом состоянии. В этом случае топливное вещество имеет аномалии в термодинамических свойствах, обладает бесконечной сжимаемостью, а прохождение ударных волн имеет ряд особенностей, связанных с возникновением ударных волн разряжения [82]. Такие волны наблюдаются вблизи критической точки, где $(\partial^2 P / \partial \rho^2)_s < 0$ [83]. Это явление может быть использовано для организации требуемого профиля топлива внутри оболочечной мишени при ее облучении мощным лазерным излучением для достижения плазмой высоких температур и плотностей, необходимых для начала реакции термоядерного горения. Кроме того, сферическая мишень с топливом в критическом состоянии, облучаемая мощным лазером, представляет собой уникальный физический объект, позволяющий в лабораторных условиях проводить исследования по изучению уравнения состояния вещества, а также получать информацию по свойствам веществ, находящихся в экстремальных условиях.

Использование мишени с топливом в критическом состоянии естественно ставит вопрос об ее производстве и доставке в лазерный фокус. Основная идея заключается в том, что первоначально топливо вымораживается на внутренней поверхности оболочки в виде твердого криогенного слоя, а затем мишень инжектируется в фокус лазерной установки. В процессе полета в камере с теплыми стенками топливо должно нагреться до критического состояния как раз в момент пролета точки схождения лазерных лучей. Алгоритм формирования критической мишени включает следующие стадии (Рис. 2.32):

■ Оболочки, расположенные в мишенном контейнере, заполняются топливом до критической плотности при комнатной температуре T = 300 K.

Мишенный контейнер с заполненными оболочками охлаждается до температуры разгерметизации, чтобы удалить топливо, находящееся вне оболочек.

• Дальнейшее охлаждение приводит к формированию твердого слоя топлива внутри оболочки, температура которой может лежать в диапазоне 4.2 К $\leq T < T_{tp}$. Заметим, что при этом вовсе не требуется формировать высококачественные топливные слои, как это делается в случае типичных криогенных мишеней. Структура топлива может быть крупно кристаллической (см. Рис. 2.326, кадр 1), а сами слои обладать сферической асимметрией и значительной шероховатостью поверхности.

• Следующий шаг – это инжекция мишени в камеру взаимодействия с лазерным излучением и ее нагрев во время полета: Рис. 2.32а \rightarrow PVT – диаграмма процесса, Рис. 2.32б \rightarrow экспериментальная реализация процесса. При нагреве мишени топливо переходит в критическое состояние с параметрами ρ_{cp} , P_{cp} и T_{cp} (плоский мениск на Рис. 2.32б, кадр 4).



Рис.2.32. Алгоритм формирования критической мишени непосредственно в процессе ее доставки в фокус лазерной установки. Детали: (а) расчетная изохора формирования при нагреве мишени (пунктирная линия на PVT - диаграмме) и (б) демонстрационные эксперименты по реализации критического состояния → плоский мениск на кадре 4 указывает на одинаковую упорядоченность двух фаз в критической точке, т.е. на одинаковые свойства вещества по обе стороны границы раздела (плотности жидкости и газа сравниваются).

Следует отметить еще одну важную деталь. Крайне перспективным является использование в дизайне критических мишеней защитных металлических покрытий. Это позволит контролировать температуру мишени в процессе ее нагрева при транспорте мишени в реакторной камере с теплыми стенками [49]. На данный момент для реализации этого подхода разрабатывается специальный вычислительный код, позволяющий определять временной промежуток, необходимый для нагрева топлива в мишени до критического состояния непосредственно к моменту прихода основного лазерного импульса.

Заключение к Главе 2

В группе Криогенных мишеней Физического института им. П.Н. Лебедева создана уникальная технология FST- формирования топливного слоя в движущихся оболочках. Создание технологии явилось результатом многолетней работы авторов (см. Таблицу 2.35):

■ Проведенный цикл теоретических и экспериментальных исследований, показал, что перспективным путем решения проблемы частотного формирования и доставки криогенных мишеней без разрушения является реализация FST-технологий (см. Диаграмму 6), работающих по замкнутому циклу: заполнение – формирование – доставка. При этом могут использоваться различные виды топлива: дейтерий D₂, а также DT смесь в стандартной (эквимолярной) композиции, или DT смесь с пониженным содержанием трития в смеси [84-86].

Таблица 2.35. Пе	рспективность F	FST- технологий d	для применения в	ИТС	[1-50,87-9	01
,	1		1			_

Заполнение								
Метод	Оболочки	Топливо	Давление	Диффузионная мода				
	Компактный и/или	• H ₂ , D ₂	До 1000	1. Атомарная мода				
Лиффузия*	пористый полимер	• DT смесь	атм	(катализатор: платина)				
Диффузия	(возможны и дру-	• Легирующие до-	при 300 К					
	гие варианты)	бавки к топливу		2. Молекулярная мода				

*/ Заполнение может осуществляться и с помощью инжекции топлива.

		Формирование		
Начальное	Скорости охлаж-	Время	Частота форми-	Время жизни по
состояние топлива	дения и добавки	формирования	рования	шкале температур
• Газообразное				
• Критическое	$q = 1 \div 50 \text{ K/s}$	$\tau_{\rm form} < 15 \ \rm cek$	Текущее значе-	4.2 K $\leq \Delta T < T_{tp}$,
• Жидкое	И	для	ние	где T _{tp} – темпера-
 Двухфазное: 	$\xi = 0.5 \div 20\%$	D ₂ и DT смеси	ν=0.1 Гц	тура тройной точки
"Жидкость + Пар"				

Принятые обозначения:

q – скорость охлаждения (необходимы высокие скорости охлаждения для получения ультра дисперсных криогенных слоев, обладающих повышенной механической и тепловой устойчивостью под действием внешних перегрузок, возникающих при доставке мишени в лазерный фокус); ξ – % содержание высокоплавких добавок к топливу (такие добавки необходимы для стабилизации ультрадисперсной структуры слоя); τ_{form} – малое время формирования позволяет минимизировать запасы трития в мишенной системе; ΔT – температурный интервал устойчивого существования ультрадисперсной структуры слоя: максимально возможный — от 4.2 К вплоть до начала плавления твердой фазы топлива T_{tp} .

■ Создано лабораторное оборудование (см. Рис. 2.33), которое моделирует весь процесс приготовления незакрепленной криогенной мишени – от ее заполнения топливом до осуществления доставки (или другими словами, инжекции мишени) в лазерный фокус.

RAME

RAME 2





Рис 2.33. Экспериментальная FST установка: (a) функциональная схема, (б) общий вид; (в) канал FSTформирования в сборке с тестовой камерой; (г) готовая мишень; (д) гравитационный инжектор.

Пояснения: 1 — модуль FST- формирования: оболочки с топливом поступают от системы заполнения в мишенном контейнере (2); 3 — спиральный канал формирования; 4 — тестовая камера; 5 — элементы 100- проекционного видео томографа для прецизионного контроля качества мишеней; 6 — оптический стол.

• Стадия доставки мишени будет обсуждаться в следующей части книги из серии *"Криогенные мишени для реактора"*. Однако уже сейчас необходимо подчеркнуть, что структура топлива должна быть устойчивой к воздействию механических и тепловых нагрузок, возникающих при транспорте мишени в камеру взаимодействия. Так, например, для камеры реактора SOMBRERO температура стенки камеры равна $T_S = 1758$ K [75]. Кроме того, на стадии ускорения мишени в инжекторе допустимые перегрузки могут составлять ~ 1000 g.

■ Разработан вычислительный код и соответствующий пакет прикладных программ (см. Диаграмму 7) для прогнозирования и анализа экспериментальных результатов по производству криогенных топливных единиц методом FST для мишеней различного дизайна, включая и мишени реакторного класса (см. Таблицу 2.36).

Применение FST-технологий позволяет впервые осуществить высокочастотное массовое производство стандартных криогенных мишеней, а также провести эксперименты с мишенями альтернативного дизайна: это так называемые критические мишени с плотностью топлива $\rho_f \sim \rho_{cp}$, или мишени с пониженным содержанием трития в DT смеси.



иаграмма 7. Пакет прикладных программ "Target Pro	luction Scheme Code".
 ► Target production scheme code ► CryoTarget Expert Group ► Shell Parameters ► Inner radius [µm] ■ 1044 Thickness [µm] ■ 3 Density [g/ccm] ■ 1.05 ► Fuel type ► Name to the ty	 Разработан пакет прикладных программ "Target Production Scheme Code" (TPSC), с помощью которого проведены расчеты всех стадий FST- формирования. ТРЅС включает следующие блоки:
Fuel Parameters • Layer thickness • Fill density Fuel layer [µm] 211	Target ParametersShell Container Depressurization
Escape Home FST Technologies Image: Target production scheme code Image: Target Expert Group Image: Target Expert Group	Target Mass Image: Sector of the sector
Target configuration Fuel Target parameters H2 O D2 O DT Inner shell radius [µm] 1044 Fuel layer thickness [µm] 211 Computation 0.448	Fuel Layering Layering Module Parameters
FuelLayer VolumeLayer MassVapor VolumeVapor MassFill DensityFill PressureFuel Mass[cmm][µg][µg][µg][mg/ccm][atm][µg]D22.34461.072.421.0897.01986.1462.15	■ Contact Area ■ Layering Time ■ Layering Time ■ Layering Time
Escape Home FST Technologie	

Слева представлен блок "Параметры Мишени" (Target Parameters), включая подблоки "Масса Мишени" (Target Mass)
 и "Конфигурация Мишени" (Target Configuration) при криогенных температурах.

Таблица 2.36. Время FST- формирования в секундах для мишеней различного дизайна (T – температура мишени непосредственно перед началом формирования слоя).

*OMEGA: Е=30 кДж			NIF: E=1.5 МДж				
Параметры ми-		Время	Параметры ми-		Время		
	шени	формирования	шени		шени		формирования
R	460 мкм	T = 37 K	R	1690 мкм	T = 37 K		
ΔR	3 мкм	4.0	ΔR	3 мкм	20.0		
W	100 мкм	4.8 сек	W	340 мкм	30.9 сек		

*/ Мишени класса **OMEGA** ($R_{OMEGA} \approx 1/3 \cdot R_{NIF}$) – "гидродинамический эк-

вивалент" достаточно близкий к мишеням для установки NIF

	*HiPER: Е~200 кДж (v≥1 Гц)						
Параметры ми-		Время	Параметры мише-		Время		
шен	и (BT-2)	формирования	ни (ВТ-2а)		ни (ВТ-2а)		формирования
R	1047 мкм	T = 37 K	R	1023 мкм	T = 37 K		
ΔR	3 мкм		ΔR	3 мкм			
W	211 мкм	13.8 сек	W	120 мкм	9.7 сек		
Wp	_		Wp	70 мкм			

*/ Криогенные мишени ударного поджига класса HiPER

	Реакторная мишень (CHGT-1): v > 10 Гц					
Пар	аметры ми-	Отношение площадей	Время			
	шени	$* \chi_{eff} =$	формир	ования		
P	2000 мим	$S_{\rm IIITHO}$ / $S_{\rm ofologyka}$	T = 37 K	T = 27 K		
Κ	2000 MKM					
ΔR	45 мкм	<i>χ_{eff}</i> =1.8 10 ⁻³ (только CH оболочка)	227.5 сек	149.0 сек		
W	200 мкм	$\chi_{eff} = 3.0 \ 10^{-2}$ (СН оболочка + металличе-	13.65 сек	8.94 сек		
		ское покрытие)				

*/ Параметр χ_{eff} зависит от материала и структуры оболочки

■ Кроме того, применение FST-технологий перспективно еще и с точки зрения снижения запасов трития в рабочей системе (Рис.2.34), что обусловлено минимизацией всех временных и пространственных масштабов на всех стадиях производства мишени.



Рис. 2.34. Запас трития как функция времени формирования мишени: (1) β -layering, (2) Infrared layering, (3) FST layering (данные работы [73]).

Прежде всего, это связано с реализацией высоких скоростей охлаждения топлива в движущихся оболочках, и как следствие, с минимизацией времени FSTформирования криогенной мишени. Именно такой подход перспективен для построения фабрики мишеней и перехода к реакторным технологиям [88-91].

Литература к Главе 2

- 1. I.V.Aleksandrova, E.R.Koresheva, I.E.Osipov. *Changes in the Morphology of Frozen Hydrogen-Isotope Layers under Target Heating*. J. Moscow Physics Soc. **3**, 85, 1993
- I.V.Aleksandrova, E.R.Koresheva, I.E.Osipov. *ICF Cryotargets: Science and Technology*. J. Moscow Physics Soc. 4, N2, 81,1994
- 3. E.R.Koresheva, I.E.Osipov, I.V.Aleksandrova. *ICF Cryotarget: Delivery*. J. Moscow Physics Soc. 4, N3, 183, 1994
- 4. I.V. Aleksandrova, A.E. Danilov, V.V. Orlov, S.I. Fedotov. *The effect of laser radiation coher*ence degree on implosion results in ICF research. J. Moscow Physics Soc. **4**, N2, 81, 1994
- 5. I.V. Aleksandrova and S.I. Fedotov. *A scope for beam smoothing relying on a special target design.* J. Moscow Physics Soc. **4**, N2, 81, 1994
- I.V.Aleksandrova, E.R.Koresheva, I.E.Osipov. *Cryogenic Fuel-Layering Techniques for High-Energy Laser Systems.* Proceed. IAEA Technical Committee Meeting on Drivers for ICF (Paris, France, November 14-18, 1994) and 10th Target Fabrication Specialists' Meeting (Taos, NM USA, February 6-10, 1995); Препринт N39, стр.120-143, ФИАН, Москва-1995
- 7. I.V. Aleksandrova, E.R. Koresheva, I.E. Osipov, L.V.Panina. *Cryotargets for Modern ICF Experiments*. Laser and Particle Beams **6**, N2, 539, 1996
- И.В.Александрова, Е.Р.Корешева, И.Е.Осипов. Инжекция как принцип транспорта мишеней между основными элементами: система заполнения-модуль формирования- мишенная камера. Препринт N34, ФИАН, Москва-1996, 25 стр.; Book of Abstract, 11-th Target Fabrication Specialists' Mtg.(Ocras Island, Washington, USA, Sept.8-12, 1996).
- 9. I.V. Aleksandrova, E.R. Koresheva, O.N. Krokhin and I.E. Osipov. *Rapid Low-Temperature Techniques for Solid Cryolayer Formation*. J. Moscow Physics Soc. 7, 213, 1997
- I.V.Aleksandrova, E.R.Koresheva, O.N.Krokhin, I.E.Osipov. Statistical Investigations of Cryogenic Target Formation and Future Trends of Development. J. Moscow Physics Soc. 9, 311, 1999
- 11. I.V.Aleksandrova, E.R.Koresheva, I.E.Osipov. *Free-Standing Targets for Applications to ICF*. Laser and Particle Beams **17**, N 4, 713, 1999
- I.V.Aleksandrova, and A.A.Belolipetskiy. An efficient method for filling targets with a highlypressurized gas fuel. Mathematical model for single- and multilayered target. J. Moscow Physics Soc. 9, 325, 1999
- 13. I.V.Aleksandrova, A.A.Belolipetskiy. *Mathematical models for filling polymer shells with a real gas fuel.* Laser and Particle Beams **17**, N4, 701, 1999
- I.V.Aleksandrova, E.R.Koresheva, I.E.Osipov, V.I.Golov, V.I.Chtcherbakov. *Microtomography* data processing methods for cryogenic target characterization. Laser Particle Beams, 17, N4, 729, 1999
- I.V. Aleksandrova, A.A. Belolipetskiy, V.I. Golov, et al. Progress in the development of tomographic information processing methods for applications to ICF target characterization. Fusion Technology 38, N2, 190, 2000
- I.V.Aleksandrova, E.R.Koresheva, I.E.Osipov, et al. *Free-Standing Target Technologies for ICF*. Fusion Technology 38, N1, 166, 2000

- 17. I.V.Aleksandrova, S.V. Bazdenkov, V.I. Chtcherbakov. *Rapid fuel layering inside moving free-standing ICF targets.* Proceed. SPIE **4424**, 197, 2001
- I.V.Aleksandrova, S.V.Bazdenkov, V.I.Chtcherbakov. *Inverse algorithm for tomographic analy*sis of backlit shadowgraphy for application to ICF targets diagnostics. Contribution to the XXVII European Conference on Laser Interaction with Matter (Moscow, Russia, October 7-11, 2002)
- I.E.Osipov, E.R.Koresheva, G.D.Baranov, et al. A Device for Cryotarget Rep-Rate Delivery in IFE Target Chamber. in: Inertial Fusion Science and Application, State of the art 2001 (EL-SEVIER), 810, 2002
- 20. E.R.Koresheva, I.E.Osipov, T.P.Timasheva, L.S. Yaguzinskiy. *The issue of homogeneous solid H₂- layers formation inside free-standing microshells*. in: Inertial Fusion Science and Application, State of the art 2001 (ELSEVIER), 767, 2002
- 21. E.R.Koresheva, I.E.Osipov, T.P.Timasheva, L.S.Yaguzinskiy. A new approach to form transparent solid layer of hydrogen inside a microshell: application to inertial confinement fusion. J.Phys.D: Appl.Phys. **35**, 825, 2002
- 22. I. V. Aleksandrova, S. V. Bazdenkov, V. I. Chtcherbakov. *Rapid fuel layering inside moving free-standing ICF targets: physical model and simulation code development*. Laser and Particle Beams **20**, 13, 2002
- 23. I.V. Aleksandrova., S.V. Bazdenkov, V.I. Chtcherbakov. Integrated FST-layering code for the optimization of fuel ice formationin moving ICF / IFE capsules. 27-ая Европейская конференция по Взаимодействию Лазерного излучения с Веществом (XXVII European conference on Laser Interaction with Matter, 7-11 октября 2002 г., Москва, Россия)
- 24. E.R.Koresheva, I.V.Aleksandrova, I.E.Osipov, et al. *Progress in the Extension of Free-Standing Target Technologies on IFE Requirements.* Fusion Sci. Technol., **43**, N3, 290, 2003
- 25. I.V.Aleksandrova, S.V.Bazdenkov, V.I.Chtcherbakov, et al. *An efficient method of fuel ice formation in moving free standing ICF / IFE targets.* J.Phys.D: Appl.Phys., **37**, 1163, 2004
- 26. I.V. Aleksandrova, A.A. Belolipetskiy, E.A. Pisarnitskaya. *Target quality thresholding in ICF research*. Preprint, A.A. Dorodnitsyn Computing Center of Russian Academy of Sciences, Applied Mathematics, 75 pp., Moscow, 2003
- E.R.Koresheva, I.E.Osipov, I.V.Aleksandrova. Free-standing target technologies for inertial confinement fusion: fabrication, characterization, delivery. Laser and Particle Beams, 23, 563, 2005
- 28. I.V. Aleksandrova, V.I. Chtcherbakov, E.R. Koresheva, E.A. Koshelev, I.E. Osipov. Large Cryogenic Target Formation In A Special R&B Cell: Mathematical Modeling And Experimental Results. Report, 29th European Conference on Laser Interaction with Matter (ECLIM), June, Madrid, 2006; Report, Target Specialists Meeting, San Diego, USA, September 2006
- 29. E.R.Koresheva, A.I.Nikitenko, I.V.Aleksandrova, et al. *Possible approaches to fast quality control of IFE targets*. Nuclear Fusion, **46**, 890, 2006
- 30. E.R.Koresheva, I.E.Osipov, I.V.Aleksandrova, et al. *Creation of a diagnostic complex for the characterization of cryogenic laser-fusion targets by the method of tomography with probing irradiation in the visible spectrum.* J.Russian Laser Research, **28**, **N**2, 163, 2007

- 31. I.V.Aleksandrova, E.R.Koresheva, I.E.Osipov, et al. *Cryogenic fuel targets for inertial fusion: Optimization of fabrication and delivery conditions.* J. Russian Laser Research **28**, N3, 207, 2007
- 32. И.В.Александрова, А.А.Белолипецкий, Е.Р.Корешева. Состояние проблемы криогенных топливных мишеней в современной программе инерциального термоядерного синтеза. Вестник РАЕН, 7, N2, 37, 2007
- 33. И.В.Александрова, Е.Р.Корешева, Е.Л.Кошелев, и др. К решению проблемы сохранения параметров криогенной мишени в процессе ее доставки в зону термоядерного горения. Вопросы Атомной Науки и Техники, серия Термоядерный синтез, **3**, 27, 2007
- 34. I.V.Aleksandrova, E.R.Koresheva, E.L.Koshelev, et al. *Multi-criteria optimization for the delivery process of IFE targets with a different fuel structure*. 2nd IAEA RCM on Coordinated Research Project "Pathways to Energy from Inertial Fusion - An Integrated Approach" (Prague, Czech Republic, May 19-23, 2008)
- 35. I.Aleksandrova, A.Belolipetskiy, E.Koresheva, et al. *Thermal and mechanical responses of cryogenic targets with a different fuel layer anisotropy during delivery process.* J. Russian Laser Research, 29 N5, 419, 2008
- 36. I.V.Aleksandrova, A.A.Belolipetskiy, E.R.Koresheva, S.M.Tolokonnikov. *Survivability of fuel layers with a different structure under conditions of the environmental effects: Physical concept and modeling results.* Laser and Particle Beams, **26**, N4, 643, 2008
- 37. I.V.Aleksandrova, A.A.Belolipeckiy, A.Blazevic, et al. *Cryogenic targets for the LAPLAS experiments: fabrication, manipulation and survival study.* Report P034, 30th European Conference on Laser Interaction with Matter (30th ECLIM, 31 Aug.-05 Sept. 2008, Darmstadt, Germany)
- 38. E.R.Koresheva, I.V.Aleksandrova, E.L.Koshelev, 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 **27**, 255, 2009
- 39. Е.Р.Корешева, И.В.Александрова. Обзор результатов, полученных ФИАН в области высокочастотного формирования и доставки криогенных топливных мишеней. XXXVII Международная (Звенигородская) конференция по физике плазмы и УТС, 8 – 12 февраля 2010
- 40. M. Tolley, F. ben Saïd, E. Koresheva, et al. *HiPER targetry: production and strategy*. Proceed. SPIE **8080**, 808023, 2011
- 41. I.V.Aleksandrova, A.A.Belolipetskiy, V.A.Kalabuhov, et al. *FST- technologies for high rep-rate production of HiPER scale cryogenic targets.* Proceed. SPIE **8080**, 80802M, 2011
- 42. I.V.Aleksandrova, A.A.Belolipetskiy, V.A.Kalabuhov, et al. *FST- technologies for high rep-rate production of HiPER scale cryogenic targets*. Workshop HiPER: the European Pathway to Laser Energy (Czech Rep., Prague, April 20-22, 2011)
- 43. I.V.Aleksandrova, A.A.Belolipetskiy, E.R.Koresheva, et al. *A specialized layering module for high rep-rate producing of free standing HiPER targets*. International conference on Fusion Science and Applications (IFSA, France, Bordeaux, September 12-16, 2011)
- 44. И.В.Александрова, А.А.Белолипецкий, Е.Р.Корешева, и др. Оптимизация процесса FSTформирования при движении массива криогенных мишеней в спиральном вакуумном канале: математическое моделирование и эксперимент. XXXVIII международная (Звенигородская) конференция по физике Плазмы и УТС, 14 – 18 февраля 2011

- 45. И.В.Александрова, А.А.Белолипецкий, Е.Р.Корешева, и др. Оптимизация процесса заполнения массива двухслойных полимерных оболочек газообразным D2 или DT топливом до давлений 1000 атм: математическое моделирование и подготовка эксперимента. ВАНТ сер. Термоядерный синтез, 4, 22, 2011
- 46. И.В.Александрова, А.А.Белолипецкий, Е.Р.Корешева, и др. *Криогенные мишени для реактора. Часть I. Диффузионное заполнение топливом сферических оболочек*. Препринт № 4, ФИАН, Москва- 2012 г., 134 стр.
- 47. И.В.Александрова, А.А.Белолипецкий, Е.Р.Корешева, и др. *Криогенные мишени для реактора. Часть II. Характеризация криогенных мишеней*. Препринт ФИАН №11, Москва-2013 г, 154 стр.
- 48. I.V.Aleksandrova, E.R.Koresheva, E.L.Koshelev, I.E.Ospov. Pilot Target Supply System Based on the FST Technologies: Main Building blocks, Layout Algorithms and Results of the Testing Experiments. Plasma and Fusion Research (the Japan Society of Plasma Science and Nuclear Fusion Research) 8, N2, 3404052, 2013
- 49. I.V.Aleksandrova, E.R.Koresheva, I.E.Ospov, et al. Ultra-fine fuel layers for application to ICF/IFE targets. Fusion Sci. Technol. 63, 106, 2013
- 50. I.V.Aleksandrova, O.M.Ivanenko, V.A.Kalabukhov, et al. *HTSC maglev systems for IFE target transport applications*. J. Russian Laser Research **35**, N2, 151, 2014
- Proceedings of 3rd European Target Fabrication Workshop, September 29 October 1, 2010, Oxford, UK
- 52. J.Sater, B. Kozioziemski, G.W. Collins et al. Cryogenic DT-Fuel Layers Formed in 1 mm Spheres by Beta-Layering. Fusion Technology **35**, 229, 1999.
- 53. R.L. McCrory, R.E. Bahr, R. Betti et al. *OMEGA ICF experiments and preparation for direct drive ignition on NIF*. Nuclear Fusion **41**, N10, 1413, 2001
- 54. T. C. Sangster, J. A. Delettrez, R. Epstein et al. *Direct-Drive Cryogenic Target Implosion Performance on OMEGA*. LLE Review **93**, 1, 2002
- 55. J.K. Hoffer, J.D.Sheliak, D.A.Geller et al. *Beta-Layering in Foam-Lined Surrogate IFE Targets*. Fusion Sci. Technol. **50**, 5, 2006.
- 56. D.R. Harding, L.M.Elasky, S.Verbridge, et al. *Formation of Deuterium-Ice Layers in OMEGA Targets.* LLE Review, Quarterly Rept. **99**, 160, 2004.
- 57. R. L. McCrory. *Progress in Cryogenic Target Implosions on OMEGA*. Rept. at the Fusion Power Associates Annual Meeting, Washington DC, December 2, 2009
- 58. S.O. Kucheev, A.V. Hamza. *Condensed Hydrogen for Thermonuclear Fusion*. Ch.IV.Solid Layering (sec.B,1), J.Appl.Phys. **108**, 091101, 2010.
- 59. S.Atzeni, C.Bellei, A. Schiavi. *Target studies for the HiPER project*. Proceed. 34th EPS Conference on Plasma Phys. Warsaw, 2 6 July 2007; Phys. Plasmas 14, 2007
- 60. C.Cavailler, N.Fleurot, T.Lonjaret et. al. *Prospects and progress at LIL and Megajoule*. Plasma Physics & Controlled Fusion. **46**, B135, 2004.
- 61. S.Nakai, G.N.Miley *Physics of high power laser and matter interactions*. Word Scientific Publishing, Singapore, **1**, 87, 1992
- 62. S.Yu.Gus'kov, N.V. Zmitrenko, V.B. Rozanov. *The Effect of the Initial Phase State of DT-Matter on the Compression of Inertial Fusion Target.* J. Russian Laser Research **32**, 596, 2011

- 63. C.Guerrero, S.Cuesta-Lopez, J.M.Perlado. Multiscale Study of Hydrogen Isotopes Structural Properties in Solid Phase in the Context of Inertial Fusion Target Manufacturing. Proceed. 7th International Conference on Inertial Fusion Sciences and Applications (France, Bordeaux, September 12-16, 2011)
- 64. R.C. Cook. A model study of the possible effect of beryllium grain sound speed anisotropy on *ICF capsule implosions*. Fusion Sci.Technol. **41**, 155, 2002
- 65. E.M.Bringa, A.Caro, M.Victoria et al. *Atomistic modeling of wave propagation in nanocristals*. J. Minerals, Metals and Materials Soc. **57**, N9, 67, 2005
- 66. R. Wanner, H. Meyer. Sound velocity in solid hydrogen and deuterium. Phys. Lett. 41A, 189, 1972
- 67. R. Wanner, H. Meyer. *Velocity of sound in solid hexagonal close-packed H2 and D2*. J. Low Temp. Phys. **11**, 715, 1973
- 68. Ю.А. Меркульев, А.А. Акунец, Н.Г.Борисенко и др. *Новые технологии в инерциальном термоядерном синтезе*. 8^е Забабахинские научные чтения (Снежинск, 5-9 сентября, 2005)
- 69. H.M.Roder, G.E.Childs, R.D.McCarty, P.E.Angerhofer. Survey of the properties of the hydrogen isotopes below their critical temperatures. NBS Techn. Note N641, 1973
- 70. P.C.Souers. *Hydrogen properties for fusion energy*. Lawrence Livermore National Laboratory, University of California Press (Berkley, Los Angeles, London), 1986
- 71. Н.Г.Борисенко, В.С.Бушуев, А.И.Громов, и др. *Технология Лазерных Мишеней в Физиче*ском Институте им. П.Н.Лебедева. Труды ФИАН **16**, N9, 1895, 1989
- 72. M.J.Monsler, Y.A.Merkul'ev, T.Norimatsu. *Target fabrication and injection*. In: Energy from inertial fusion (IAEA, Vienna), 151, 1995
- 73. A.Nobile, A.M. Schwendt, P. L. Gobby, et al. *Tritium Inventory of IFE Target Fabrication Facilities*. 2nd IAEA Meeting on Phys. Tech. IFE Targets and Chambers (San Diego, USA, June 17-19, 2002)
- 74. T.Norimatsu, K.Nagai, T.Takeda, K.Mima, T.Yamanaka. *Update for the drag force on an injection pellet and target fabrication for inertial fusion*. Fusion Sci. Technol. **43**, N3,339, 2003
- 75. D.T.Goodin, N.B.Alexander, L.C.Brown et al. *Demonstrating a target supply for inertial fusion energy*. Proceed. 3rd IAEA RCM on Physics and Technology of IFE Targets and Chambers (11-13 October, 2004, Daejon, Rep.Korea), <u>http://aries.ucsd.edu</u>
- 76. ICF Handbook 2005. Fabrication, characterization, and production of equipment and targets produced and manufactured by General Atomics and Schafer Corporation. http://fusion.gat.com/icf/ICF_Catalog/catalog.pdf
- 77. Ю.А.Меркульев. *Миниатюрные критические массы термоядерного горючего и делящихся* элементов. Препринт ФИАН №16, Москва-2010, 134 стр.
- 78. J.P.Frank, R.Wanner *Elastic constants of hcp He*⁴. Phys. Rev. Lett. **25**, N6, 345, 1970
- 79. S.Landolt-Bornstein. *Elastic, piezoelectric and related constants of crystals*. New series, III/1 (R.F.S.Hearmon and K.H.Hellwege eds., Springer verlag, New York, 1966)
- 80. Ю.Д.Третьяков, Е.А.Гудилина. Синтез "левитирующих" ВТСП-материалов: от фантастики к реальности. Изд.: Химия, 408 стр., 2001
- 81. B.V.Kuteev. *Interaction of cover and target with xenon gas in the IFE-reaction chamber*. Research Report NIFS-718, National Institute for Fusion Sci., Japan, Nov. 2001

- 82. YA.B. Zel'dovich, Y.P. Raizer, "Physics of Shock Waves and High-Temperature Hydrodynamic Phenomena", Academic Press (Dover, NY), (1966-67) 488; Ya.B. Zel'dovich. On the Possibility of Rarefaction Shock Waves. J. Experimental and Theoretical Physics, 16, 363, 1946 (in Russian).
- AL.A. Borisov, A.A. Borisov, S.S.Kutateladze, V.E. Nakoriakov, "Evolution of Rarefaction Waves Near Thermodynamic Critical Point", J. Experimental and Theoretical Physics Letters, 31, 585, 1980
- 84. S.Kawata, H. Nakashima. *Tritium content of a DT pellet in inertial confinement fusion*. Laser Part. Beams **10**, 479, 1992
- 85. S. Eliezer, Z.Henis, J.M.Martinez-Val, I.Vorobeichik. *Effects of different nuclear reactions on internal tritium breeding in deuterium fusion*. Nucl. Fusion **40**, 195, 2000
- 86. А.М.Опарин. Численное моделирование горения однородных DT_x мишеней с помощью кода ALPHA. Режимы воспроизводства трития для масс топлива 5-100 мг. Отчет в рамках проекта МАГАТЭ №11536/RBF, Москва-2004 г
- Ландау и Лифшиц. Теоретическая физика, Том VII, Теория упругости, Москва, Изд. Наука, 1987
- 88. I.V.Aleksandrova, A.A.Belolipetskiy, E.R.Koresheva et al. *Insight into the Relation between the Fuel Microstructure and IFE Targets Response under Their Fabrication, Injection and Transport through the Reaction chamber.* Proceed. 1st Conference on Laser Inertial Fusion Energy (CLIFE 2012), Yokohama, Japan, April 26 27, 2012
- I.V.Aleksandrova, E.R.Koresheva, E.L.Koshelev, I.E.Ospov. *Pilot Target Supply System Based* on the FST Technologies: Main Building blocks, Layout Algorithms and Results of the Testing *Experiments*. Proceed. 1st Conference on Laser Inertial Fusion Energy (CLIFE 2012), Yokohama, Japan, Apr. 26 - Apr. 27, 2012
- 90. E.R. Koresheva. High Rep-Rate Production of IFE Targets Using the FST Technologies: Progress Results and Aspects of Commercialization. Proceed. 1st Conference on Laser Inertial Fusion Energy (CLIFE 2012), Yokohama, Japan, Apr. 26 - Apr. 27, 2012
- 91. И.В.Александрова, Е.Р.Корешева, Е.Л.Кошелев и др. Механический макет реактора ИТС для оптимизации технологий частотного формирования и доставки криогенных топливных мишеней. XLI Международная конференция по Физике Плазмы и УТС (Моск. обл., Звенигород, 10 – 14 февраля, 2014)



Представители России: Е. Корешева, Б. Шарков и В. Зворыкин

В совещании 2010 года принимали участие 25 специалистов из 14 стран,

в том числе из

РОССИИ, США, ЯПОНИИ, АНГЛИИ, ФРАНЦИИ, ГЕРМАНИИ, ИТАЛИИ, ИСПАНИИ, ЧЕХИИ, ВЕНГРИИ, ПОЛЬШИ, КОРЕИ, ИНДИИ и УЗБЕКИСТАНА.



Таблица 1. Компактные полимеры								
Материал		Полистирол		Полиамид			GDP- полимер	
Плотность (<i>р</i>), кг/м ³		1050		14	400		1200-1040	
Предел прочности (о) на	300 К	20-30		100	- 400		300	
растяжение, МПа	100-40 К	44-68			-		-	
Предел прочности на сжатие	, МПа (300К)	75			-		-	
Модуль Юнга (<i>E</i>), ГПа (300 I	К)	1.0-3.8	3	3	- 15		1.4-2.6	
Коэффициент Пуассона, (300) К)	0.3			-		-	
Коэффициент теплопро-	300 K	0.08-0.1	2	0.14	-0.20		-	
водности (λ), Вт/(м ·К)	40 K	0.152		1	-		-	
Теплоемкость (С), Дж/кг•К	300 K	1260		101	⁺ -10 ¹⁵		-	
	40 К	226	15	-		15		
Коэффициент газопрони-	$D_2(300K)$	3.5-6.0 1)-15	1.8 10-14			6.5 10-15	
цаемости, моль•м/м ² •Па•сек	DT (300K)	3 10-13		-			-	
		Таблица 2. По	ристые	е полимерь	ı			
		Пенополи-	Дивин	ил-бензол	Ресорцино	л-	Пенополи-	
Материал		стирол	(3-5%)	со стиро-	формальден	гид	стирол марки	
		типа HIPE	лом	(DVB)	(RF)		ПСБ-С	
Плотность, кг/м ³		15-700		100	100 - 200)	15-30	
Предел прочности на растяж	ение, МПа	-	55.	1-62.0	-		0.015-0.1	
Предел прочности на сжатие, МПа		0.16-5.2 (*)		-	-		0.04-0.16	
Модуль Юнга, МПа		5.6-21 (*)	(0.17	-		473	
Размер пор, мкм		1-10		1-3	0.02-0.17	7	50-100	
Тип пор		открытые	откр	ытые и	открытые	e	закрытые	
			зак	рытые				
Коэффициент теплопроводности	и, Вт/м •К	-		-	-		0,037 - 0,041	
Теплоемкость, Дж/кг•К		-		-	-		1530-1650	

Приложение 1. Свойства материалов. Сводная информация по свойствам полимеров [1-20]

Таблица 3. Предел прочности на растяжение (σ), измеренный при криогенных температурах для оболочек из полистирола производства ФИАН (аспектное отношение оболочек ~ 42)

Р _f , атм	2R, мкм	W, мкм	Т, К	Р _{іп} , атм	σ, MΠa
205	955	27	61.5	32	67,2
305	940	39	63.5	47	98,7
445	949	54	46	35	73,5
765	983	88	43	38	79,8

Таблица 4. Теплопроводность (λ) и теплоемкость (С) полистирола.

Т, К	λ, Вт/м·К	Т, К	λ, Вт/м•К	Т, К	<i>С</i> , Дж/кг·К	Т, К	С, Дж/кг•К
4.2	0.029	80	0.1150	5	10.05	120	523.00
10	0.0541	90	0.1184	10	32.16	140	594.13
20	0.0744	100	0.1231	20	102.11	160	661.07
30	0.0863	150	0.1326	30	170.45	180	728.02
40	0.0947	200	0.1407	40	226.73	200	799.14
50	0.1012	250	0.1472	50	270.55	220	874.46
60	0.1066	300	0.1539	60	311.95	240	949.77
70	0.1111	350	0.1594	70	346.52	260	1029.26
		370	0.1616	80	381.50	273	1075.29
				90	420.49	280	1108.76
				100	460.24	293	1163.15
						300	1196.62

Литература к Таблицам 1-4

1. Elements of power plant design for inertial fusion energy, Final report of a coordinated research project 2000-2004. IAEA-TECDOC-1460, IAEA (Vienna), 2005

2. 3rd ETFW, Oxford, UK, September 29 – October 1, 2010; <u>http://www.clf.rl.ac.uk/News+and+</u> <u>Events/18838.aspx</u>

3. А.Г. Дементьев, О.Г. Тараканов. Влияние ячеистой структуры пены на механические свойства пенопластов. Механика Полимеров, **4**, 594, 1972

4. А.И.Исаков, Е.Р.Корешева, Ю.А.Меркульев и др. *Интерференционные Измерения Проницаемости Полимерных Микробаллонов*. Краткие Сообщения по Физике ФИАН, N2, 30, 1983

5. С.А.Рейтлингер. Проницаемость полимерных материалов. М. Химия, 1974, 36 с.

6. <u>http://aries.ucsd.edu/pulsifer/PROPS/mech_solid_hydrgn.shtml</u> (Database information library of UCLA)

7. Энциклопедия Полимеров. М.: Советская Энциклопедия, 1972

8. <u>http://www.suraplastik.ru/index.php?option=com_content&view=article&id=34&Itemid=46</u>

9. Кожевников И.Г., Новицкий Л.А. Теплофизические свойства материалов при низких температурах. Справочник. 2-е изд., М.: Машиностроение, 1982. 328 с

10. Справочник по физико-техническим основам криогеники. под ред М.П.Малкова. М.: Энергия, 1973, 392с.

11. Kobayashi S. et al. Annealing of polystyrene microcapsules for inertial confinement fusion experiments. J. Vac. Sci. Technol. A 9, N1, 150, 1991

12. Inertial Confinement Fusion, LLNL Annual Report, 1998, sec. Polyimide capsules, http://www.oldlitho.com/lithodowns/fusion1.pdf

13. http://www.estrocom.ru/img3.html

14. <u>http://www.polymery.ru/production.php?cat_id=52&cat_parent=7&level=3</u>

15. J.R.Benson. Highly porous polymers. American Laboratory, April 2003

16. ICF Handbook 2005. Fabrication, characterization, and production of equipment and targets produced and manufactured by General Atomics and Schafer Corporation

17. K.Nagai et al. *Foam materials for cryogenic targets fast ignition realization experiment (FIREX)*. Nuclear Fusion, **45**, 1277, 2005

18. http://maxmir.com/synthetic

19. G.W. Milton "Mechanics of composites", Cambridge University Press, 2000

20. M. Y. Corapcioglu "Advances in porous media", Elsevier, 1996

Сводная информация по свойствам топлива

T(K)/ D ₂	$Πap(ρ_v)$	Жидкость/Тв. (р _с)	$(\rho_c - \rho_v)$		T(K)		DT
38.340 (T _{кр})	6.9801E+01	6.9801E+01	0.0000E+00			$\rho_{\rm v}$	ρ _c
38.000	5.4126E+01	8.6390E+01	3.2264E+01		1.2	6F 14	228
37.000	4.0209E+01	1.0251E+02	6.2296E+01		4.2	2.65E.0	220
36.000	3.2106E+01	1.1239E+02	8.0281E+01λ		0	<u> </u>	227,5
35.000	2.6180E+01	1.1990E+02	9.3719E+01		0	<u>2.7E-0</u> 1.55E /	220,3
34.000	2.1527E+01	1.2607E+02	1.0454E+02		10	2 35E 3	224,8
33.000	1.7751E+01	1.3135E+02	1.1360E+02		12	0.017	224,4
32.000	1.4634E+01	1.3601E+02	1.2138E+02		14	0.017	223
31.000	1.2035E+01	1.4019E+02	1.2816E+02		10	0.08	221,5
30.000	9.8575E+00	1.4400E+02	1.3415E+02		10 71 (T)	0.20	220
29.000	8.0288E+00	1.4752E+02	1.3949E+02		20	0.025	221
28.000	6.4932E+00	1.5079E+02	1.4429E+02		20	1.36	220.33
27.000	5.2061E+00	1.5385E+02	1.4864E+02		22	2.43	213.23
26.000	4.1314E+00	1.5673E+02	1.5260E+02		24	4.045	209.4
25.000	3.2389E+00	1.5946E+02	1.5622E+02		20	6.25	105.85
24.000	2.5032E+00	1.6205E+02	1.5955E+02		20	0.35	193.83
23.000	1.9026E+00	1.6451E+02	1.6261E+02		30	9.0	178.2
22.000	1.4181E+00	1.6686E+02	1.6544E+02		32	20.4	1/0.3
21.000	1.0331E+00	1.6910E+02	1.6806E+02		25	20.4	160.0
20.000	7.3249E-01	1.7123E+02	1.7050E+02		35	24.0	152.05
19.000	5.0303E-01	1.7328E+02	1.7277E+02		30	29.0	135.95
18.710 (T _{TP})	4.4802E-01	1.7386E+02	1.7341E+02		30 /2 (T)	87	87
18.710	4.4802E-01	1.9670E+02	1.9625E+02		<i>39.</i> ч 2 (1 _{кр})	07	07
13.000	0.0000E+00	2.0040E+02	2.0040E+02	Тт	_р - температура	тройной точ	ки
4.200	0.0000E+00	2.0589E+02	2.0589E+02	Τ _κ	р - температура	критическо	й точки

Таблица 5. Плотности (мг/см³) D₂ и DT смеси в двухфазной области [1,2]

ρ_c - плотность конденсированной фазы

ρ_v - плотность пара

Таблица 6. Теплопроводность твердого и жидкого топлива (насыщение), Bm/(м·K) [1,2]

T(K)	n-D2	DT
4.2	0.46	0.08
4.2	0.40	0,08
5	0./1	-
6	0.9	0,54
8	1.3	1,27
10	1.04	1,33
12	0.75	1,05
14	0.56	0,84
16	0.41	0,62
18	0.3	0,4
18.71 (Т _{тр} для D2)	0.27	-
19	0.100	-
19.71 (Т _{тр} для DT)	-	0,24
20	0.100	-
22	0.100	-
23	0.100	-
25	0.110	-
26	-	-
27	-	-
28	-	-
30	-	-
32	-	-
34	-	-
35	-	-
36.2	-	-
38	0.110	-

Таблица 7. Теплоемкость твердого и жидкого топлива (насыщение), Дж/(кг·К) [1,2]

T(K)	n-D ₂	DT
4.2	125	20
6	150	80
8	275	240
10	575	660
12	1025	1280
14	1450	1940
16	2025	2720
18	2675	3540
Тройная	2950	4280
точка	5500	-
20	5750	6400
22	6000	6800
24	6500	7200
26	7250	7800
28	8000	8400
30	9000	9200
32	10500	10000
34	12250	11400
35	13500	12200
36	-	13000
37	-	14200

T(K)	λ
20	0.0120
40	0.0262
80	0.049
150	0.081
200	0.101
300	0.133

Таблица 8. Теплопроводность газообразного D₂, Bm/(м·K) [1,2].

T(K)	n-D ₂	DT
Т _{тр} (сублимация)	364,583	313,492
Т _{тр} (испарение)	314,980	269,841
Т _{тр} (плавление)	49,355	43,254
4.2	307,539	265,873
6	315,920	271,825
8	324,901	279,762
10	334,821	287,698
12	342,262	295,635
14	352,183	301,587
16	357,143	305,556
18	364,583	309,524
20	314,980	269,841
22	310,020	265,873
24	302,579	263,889
26	290,179	255,952
28	277,778	244,048
30	260,417	228,175
32	238,095	210,317
34	208,333	186,508
35	188,492	170,635
36	166,171	152,778
37	141,369	130,952

Таблица 9. Теплота плавления, испарения и сублимации, Н (кДж/кг) [1,2].

Таблица 10. Поверхностное натяжение (η) изотопов водорода [3]

Изотопы водорода	А, дин/см	В, см·К
H ₂	5.25	0.162
HD	6.53	0.188
D_2	7.90	0.218

 η =A-BT, T_{nn} < T < 20.4 K
		Модуль Юнга	Прочность на рас-	Предел текуче-	Модуль сдвига
	Т, К	(МПа)	тяжение (кПа)	сти (кПа)	(МПа)
	4.2	473	534	327	182
	6	461	-	-	177
D_2	8	446	496	284	169
	10	436	-	-	162
	12	424	424	244	152
	14	405	373	207	149
	16	392	298	159	138
	17	387	261	79	134

Таблица 11. Механические свойства дейтерия [4].

Литература к таблицам 5-11

- 1. H.M.Roder, G.E.Childs, R.D.McCarthy, P.E.Angerhofer. *Survey of the properties of the hydrogen isotopes below their critical temperature*. NBS Technical Note, Monograph 74, 1965
- 2. P.C.Souers. Hydrogen properties for fusion energy. University California Press, Ltd., 1985
- 3. Б.И.Веркин, В.Г.Манжелий, В.Н.Григорьев и др. Свойства конденсированных фаз водорода и кислорода. Справочник. Киев, «Наукова Думка», 1984
- 4. М.П.Малков, И.Б.Данилов, А.Г.Зельдович, А.Б.Фрадков. Справочник по физикотехническим основам криогеники. под ред. М.П.Малкова. М. Энергия, 1973



Приложение 2

Геометрическое пятно контакта

При формировании мишени методом FST [1-6] реализуется, так называемый, "умеренный" отбор тепла, если сравнивать FST-формирование с двумя крайними случаями:

- быстрый отбор тепла, когда вся мишень целиком погружена в жидкий гелий,

– медленный отбор тепла за счёт излучения с поверхности оболочки, когда вся мишень целиком окружена вакуумом (см. Главу 2, § 1).

Практически, умеренный отбор тепла реализуется, когда лишь часть поверхности мишени при движении ее в канале формирования находится в тепловом контакте с окружающей средой. Контакт происходит в месте прижимания оболочки мишени к стенке канала (Рис. 1). Прижимаясь, оболочка слегка деформируется, и образуется контактное пятно S_{ca} , которое будем характеризовать следующим соотношением: $S_{ca} = \chi \cdot S_{sh}$, где S_{sh} – площадь поверхности оболочки, χ – параметр задачи, который учитывает не только геометрические, но и тепловые особенности взаимодействия стенки канала и оболочки мишени, связанные с учет тангенциальных градиентов температуры. Отметим, что область распределения температуры по оболочке является значительной по сравнению с геометрическим размером пятна контакта, что существенным образом влияет на скорость охлаждения мишени. На практике, в условиях FST эксперимента, образуется эффективное пятно контакта χ_{eff} = геометрическое (χ_g) + те-

пловое (χ_t), которое порядок больше геометрического (см. Приложение 3).



Рис. 1. Для симметризации слоя мишень должна вращаться при ее движении в канале формирования (а – начальное состояние топлива "жидкость+пар"). Параметр γ отражает влияние кривизны внутренней поверхности канала.

Особое значение для метода FST имеет время существования жидкой фазы топлива τ_{liquid} внутри оболочки в процессе образования криогенного слоя. Это время должно быть достаточным, чтобы симметризовать слой (Рис.1а). Как было показано [1-3], величина τ_{liquid} даже для небольших толщин криогенного слоя (W = 20 - 30 мкм) существенно зависит от параметра χ .

Таким образом, поскольку темп отбора тепла, а значит и характерные времена процесса FST-формирования, в основном, контролируется размером контактного пятна, то проведение тщательного анализа всех особенностей взаимодействия оболочки с топливом со стенкой канала представляется совершенно необходимым для создания базовой модели FSTформирования, предназначенной для расчета мишеней различного дизайна.

В настоящем Приложении рассмотрим вопрос о расчете геометрического пятна контакта χ_g , возникающего под действием веса мишени при ее качении вдоль канала формирования. Сначала мы получим результат, соответствующий случаю плоской подложки, или, если быть более точным, случаю, когда $R \ll R_{tube}$ (R – внешний радиус оболочки, R_{tube} – радиус канала формирования), а затем учтем увеличение параметра χ_g с помощью геометрического фактора γ (Рис.1б, в).

§ 1. Постановка задачи

Итак, метод FST, или «умеренный» отбор тепла, реализуется, когда лишь часть поверхности мишени, причём, малая часть, находится в тепловом контакте с окружающей средой. При движении в канале формирования контакт происходит в месте прижимания оболочки мишени к стенке канала. Прижимаясь, оболочка слегка деформируется, и образуется контактное пятно. Размер контактного пятна можно оценить из следующих энергетических соображений: вся работа, связанная с перемещением центра тяжести сферы за минусом работы противодействующих сил давления, идет на деформацию оболочки. Предполагается, что оболочка остается сферой постоянного радиуса за исключением ее нижней части. Сегмент нижней части оболочки, деформируясь, превращается в круговое пятно того же радиуса, *но меньшей площади.* На упругое сжатие сегмента затрачивается энергия, о которой говорилось ранее. Считаем, что процесс деформации заканчивается в тот момент, когда кинетическая энергия движения центра масс равна нулю. Иллюстрацией к решению задачи служат рисунки 2 - 5.

§ 2. Вывод основных соотношений

Пусть сферическая оболочка деформировалась так, что ее радиус не изменился, а сегмент АаВ ее контакта с твердой горизонтальной поверхностью превратился пятно контакта диаметра АВ (Рис. 2). При вертикальном перемещении всех элементов оболочки вниз на величину *dw* работа сил тяжести равна

$$dA_g = (G - g(w))dw.$$
(1)

Здесь G – вес оболочки с наполняющим ее топливом;



Рис. 2. К выводу основных соотношений.

g(w) – вес пятна контакта, который составляет долю веса оболочки, пропорциональную пло-

щади сегмента AaB, и равен $g(w) = G_{sh} \frac{S_{AaB}}{4\pi r^2} = G_{sh} \frac{w}{2r}$. (1a)

Пусть в начальный момент оболочка находилась под внутренним давлением p (имеется в виду давление топливного газа внутри оболочки). Работа сил давления на пятно контакта, (оно не перемещается), равна нулю. Далее, работа сил давления на часть поверхности сферы S_1 S_2 в силу её симметрии относительно плоскости, проходящей через середины дуг S_1 и S_2 тоже равна нулю. Работу сил давления на купол сферы S_0 можно записать в виде

$$dA_{p} = -p(w)\pi \frac{AB^{2}}{4}dw = -\pi p(w) \left[r^{2} - (r - w)^{2}\right]dw =$$
$$= -2\pi r^{2} p \left(\frac{w}{r} - \frac{w^{2}}{2r^{2}}\right)dw.$$
(2)



Рис. 3. Увеличение радиуса пятна контакта при деформации оболочки.

Рис. 4. Трансформация сегмента оболочки (вырезаемого углом ВОС) в прямоугольник.

Рассмотрим следующую вспомогательную задачу \rightarrow подсчитать энергию, затраченную на сжатие параллелепипеда неизменной ширины *a*, имеющего начальную длину *L* и конечную длину *l* при условии, что его начальная высота равна *h* (см. Рис. 5).



Рис. 5. К расчету энергии, затраченной на сжатие параллелепипеда неизменной ширины

Пусть x – промежуточная длина деформируемого параллелепипеда. Поскольку объем и ширина параллелепипеда остаются неизменными, то его высота H(x) = Lh/x. Работа по перемещению правой грани на расстояние dx равна

$$dA = F(x)dx = aH(x)E\frac{x-L}{L}dx$$
.

Последняя формула есть следствие закона Гука для малых отношений $\frac{L-x}{L}$ (*E* – модуль Юнга). Интегрируя формулу по *x* от *L* до *l* с учетом зависимости *H*(*x*), получим следующее соотношение:

$$A = ahE\left[(l-L) - L\ln\left(\frac{l}{L}\right)\right] = ahE\frac{(L-l)^2}{2L} + O\left(\frac{L-l}{L}\right)^3$$
(3)

Если оболочка, деформируясь, опустится на dw, то пятно контакта увеличит свой радиус на dl (см. Рис. 3). При этом сегмент оболочки, вырезаемый углом ВОС, при деформации превратится в прямоугольник, изображенный на Рис.4. Здесь $H = h \frac{dL}{dl} = \frac{h}{\cos \alpha}$, h – толщина стенки оболочки. Пусть $d\phi$ дифференциал угла поворота плоскости рисунка АОВ вокруг вертикальной оси, проходящей через О. На деформацию элемента сегмента оболочки высоты h и с основанием, имеющим размеры BC = dL и AB/2 $d\phi$, в параллелепипед высоты H, но с основанием, имеющим размеры dl и AB/2 $d\phi$ = $r \sin \alpha \cdot d\phi$, требуется энергия

$$dA_d = r \sin \alpha \ d\phi \ hE \cdot \frac{(dL - dl)^2}{2dL} \ . \tag{4}$$

Приведенная формула есть следствие соотношения (3), где вместо величин L и l подставлены величины dL и dl, а ширина a заменена выражением $r \sin \alpha \cdot d\phi$. Разность

$$dL - dl = dL(1 - \cos\alpha) = r(1 - \cos\alpha)d\alpha, \qquad (5)$$

где r – радиус серединной поверхности оболочки. В дальнейшем предполагается, что оболочка тонкая, т.е. h/r мало. Подставим (5) в (4) и, проинтегрировав (4) по ϕ от 0 до 2π , получим соотношение (6)

$$dA_d = \pi r^2 h E (1 - \cos \alpha)^2 \sin \alpha \, d\alpha \,. \tag{6}$$

Из закона сохранения энергии имеем

$$dA_d \le dA_g + dA_p - dE_k \,, \tag{7}$$

где dE_k - дифференциал изменения кинетической энергии движущейся части оболочки. Знак неравенства в (7) связан с тем, что возможно не вся энергия расходуется на образование пятна контакта, а какая-то ее часть идет на нагревание оболочки, деформацию ее боковых стенок и т.д.

Предполагаем, что деформации малы ($w/r \ll 1$). Обозначим w_0 такую величину деформации, при которой кинетическая энергия движения оболочки с газом равна нулю. Оценим полученное при этом пятно контакта. Пусть соответствующее значение угла α равно α_0 (см. Рис. 2). Очевидно, что

$$w_0 = r(1 - \cos \alpha_0).$$
 (8)

Проинтегрируем левую часть неравенства (7) по α от 0 до α_0 , используя (6), а правую по w от 0 до w_0 , используя (1)-(1а) и приближенную формулу (2). Учтем при этом, что

$$\int_{0}^{w_{0}} dE_{k}(w) = E_{kf} - E_{ki} ,$$

где $E_{ki} = Mv^2/2$ - начальное значение кинетической энергии при падении оболочки на горизонтальную поверхность, (M – масса оболочки вместе с топливом), а E_{kf} ее конечное значение, равное нулю. Переходя в левой части от α_0 к w_0 с помощью (8), получим из (7) интегральное неравенство (9):

$$\frac{\pi h E r^2 z^3}{3} \le Grz - \frac{G_{sh}r}{4} z^2 - \pi r^3 p z^2 + \frac{\pi p r^3}{3} z^3 + \frac{M v^2}{2}, \qquad (9)$$

где $z = w_0/r$, G – вес оболочки с топливом. Это кубическое неравенство относительно z, которое мы используем для оценки геометрического пятна контакта.

Рассмотрим случай, когда геометрическое пятно контакта возникает при деформации упругой тонкостенной сферической оболочки, лежащей (т.е. v = 0) на твердой плоской поверхности (см. Рис. 1б). Это практически соответствует условиям FST формирования, если не брать в рассмотрение геометрический фактор γ , который учитывает возрастание пятна контакта при взаимодействии мишени с поверхностью, обладающей определенной кривизной (например, при ее движении по спиральному каналу формирования, см. Рис. 1в).

Итак, пусть v = 0 и p = 0. Тогда $G = G_{sh}$ и неравенство (9) примет вид

$$\frac{\pi \delta E r^2 z^2}{3} \le G_{sh} \left(1 - \frac{z}{4}\right),$$
где $\delta = \frac{h}{r}$

Параметр $z = \frac{w_0}{r}$ можно оценить следующим образом

$$z \leq \frac{\sqrt{1 + \frac{64 \pi \delta Er^2}{3G_{sh}} - 1}}{8 \pi \delta Er^2 / 3G_{sh}}.$$

Если знаменатель полученного выражения велик (например, для мишеней класса HiPER он больше 10⁶), то можно использовать асимптотическую формулу

$$z \le \sqrt{\frac{3G}{\delta \pi E r^2}} \,. \tag{10}$$

Теперь можно оценить площадь геометрического пятна контакта, которая равна

$$s = \pi \left(r^2 - (r - w_0)^2 \right) = 2\pi r^2 \left(\frac{w_0}{r} - \frac{w_0^2}{2r^2} \right) \approx 2\pi r^2 z .$$
 (11)

Тогда отношение площади пятна к площади внешней поверхности оболочки можно записать в следующем виде

$$\chi_g = \frac{s}{4\pi r^2} = \frac{z}{2} = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{3G}{\delta \pi E r^2}} .$$
(12)

Отметим, что везде выше вместо величины G может присутствовать нормальная реакция опоры, например, при качении оболочки по криволинейному каналу формирования. Величину r (радиус серединной поверхности оболочки) заменим на внешний радиус оболочки R, что позволит иметь некоторый запас при расчетах времени вымораживания слоя по методу FST. Толщину оболочки h обозначим привычным символом ΔR . Тогда, окончательно имеем:

$$\chi_g = \frac{1}{2} \left(3G / \pi \delta ER^2 \right)^{1/2}, \quad \delta = \Delta R / R$$
(12a)

§ 3. Геометрического пятна контакта для мишеней класса HiPER

С целью демонстрации энергии термоядерного синтеза в реакторе ИТС в Европе создается мощная лазерная установка HiPER (High Power laser Energy Research) [7].

Работа на установке HiPER требует формирования и доставки криогенных бесподвесных мишеней ударного поджига с высокой частотой (≥ 1 Hz). В настоящее время для базовой мишени рассматривается два типа оболочек, параметры которых подробно описаны в Главе 2, §3.

Напомним, что базовая мишень класса HiPER представлена в двух модификациях:

ВТ-2 – сферическая полимерная оболочка (Ø~2 мм, толщина 3 мкм) с намороженным на ее внутренней стороне топливным слоем (211 мкм) и

ВТ-2а – аналогичная тонкая оболочка (Ø~2 мм, толщина 3 мкм) с прилегающим слоем "полимерная пена + DT" (70 мкм), за которым идет твердый слой из чистого DT- топлива (120 мкм).

Прежде всего, отметим, что обе оболочки (ВТ-2 и ВТ-2а) тонкие, т.е. отношение δ мало, и составляет ~ $3 \cdot 10^{-3}$. Далее, если оболочки первоначально заполнены газообразным топливом (дейтерием или DT смесью) до P_f ~ 1000 атм (требуемое давление заполнения при комнатной температуре T = 300 K), то при формировании слоя топливо сначала становится жидким, а затем вымораживается на стенке мишени при температуре тройной точки T_{tp} . В этих условиях давление внутри оболочки мало по сравнению с величиной P_f (см. Таблицу 1, строка 4), поэтому вполне можно использовать формулу (12а), в которой G есть вес оболочки с топливом.

Таблица 1. Давление и температура для изотопов водорода и их смесей в точке нормального кипения и тройной точке [8].

Изотопы водорода	H_2	D_2	T ₂	DT смесь
<i>Т_{bp}</i> , К	20.39	23.66	25.04	24.38
<i>Р_{bp}</i> , атм	1.0	1.0	1.0	1.0
<i>Т_{tp}</i> , К	13.96	18.71	20.62	19.71
<i>Р_{tp}</i> , атм	0.07	0.17	0.21	0.19

Обозначения к Таблице 3: *Т_{bp}* и *P_{bp}* –температура и давление в нормальной точке кипения; *Т_{tp}* и *P_{tp}* –температура и давление в тройной точке.

Для определенности выполним расчеты для мишени ВТ-2. Полученные результаты представлены в Таблице 2 для всего возможного спектра значений модуля Юнга *E* (от 1 ГПа до 15 ГПа), т.е. для 3-х различных материалов оболочки: полиимид, полистирол и GDP-полимер (см. Приложение 1), которые предполагается использовать для мишеней класса HiPER [6,7]:

• <u>Материал оболочки: полиимид</u> (ρ_{sh} = 1.4 г/см³)

$$E = 3.2 - 15$$
 ГПа, $K_{D2} = 1.78 \ 10^{-14}$ моль м /м² с Па.

■ <u>Материал оболочки: полистирол</u> (ρ_{sh} = 1.05 г/см³)

E = 1.0-3.2 ГПа, $K_{D2} = 3.5 \ 10^{-15}$ моль·м /м²·с·Па, $K_{DT} \sim 3.1 \ 10^{-15}$ моль·м /м²·с·Па E = 3.83 ГПа, $K_{D2} = 6.0 \ 10^{-15}$ моль·м /м²·с·Па, $K_{DT} \sim 5.4 \ 10^{-15}$ моль·м /м²·с·Па **Материал оболочки: полимер, полученный методом** GDP ($\rho_{sh} = 1.2 - 1.04 \ \text{г/см}^3$) E = 1.4-2.6 ГПа, $K_{D2} = 6.5 \ 10^{-15}$ моль·м /м²·с·Па, $K_{DT} \sim 5.8 \ 10^{-15}$ моль·м /м²·с·Па

Таблица 2. Размер пятна контакта для мишени ВТ-2.

Мишаш	χ_{g}		<i>R_{ca}</i> (мкм)/ <i>w</i> ₀ (мкм)		
RT-2	$E = 1 \Gamma \Pi a$	15 ГПа	1 ГПа	15 ГПа	
D1-2					
	6.3×10^{-4}	1.6×10^{-4}	26 /0.33	13/0.08	

Обозначения к Таблице 4: Е – модуль Юнга;

R_{ca} – радиус контактного пятна, *w*₀ – прогиб оболочки при деформации.

Таким образом, мы показали, что в условиях FST-формирования гарантированно образуются пятна контакта с характерным размером $\chi \ge 10^{-4}$. Отметим, что полученный результат соответствует случаю плоской подложки (Рис. 1б). Практически, при качении мишени по спиральному каналу формирования (см. Рис. 1в) увеличение пятна контакта можно оценить с помощью геометрического фактора γ [9]:

$$\gamma = \sqrt[3]{\frac{1}{\left(1 - \frac{R}{R_{tube}}\right)}}$$

Это обстоятельство необходимо учитывать при проектировании модуля формирования для мишеней любого класса, поскольку темп отбора тепла из мишени контролируется размером контактного пятна, который может быть изменен в эксперименте за счет изменения геометрии канала формирования. Это открывает определённые возможности для оптимизации метода FST, т.к. размер пятна контакта и время его существования обусловлены характером движения мишени в канале с заданным изменением профиля.

Увеличение пятна контакта связано еще и с тепловыми эффектами, когда пятно контакта как бы "расплывается", так как передача тепла идет не только по одному направлению, но и в стороны (так называемое " тепловое пятно контакта " возникающее при учете тангенциальных градиентов температуры). Эффект "теплового пятна контакта " обсуждается в Приложении 3. Там же получена оценка площади пятна контакта при решении задачи о тангенциальном распространении тепла через распределенные источники, которые соответствуют радиальному тепловому потоку. Показано, что в условиях FST эксперимента образуются пятна контакта (геометрическое + тепловое) с размером $\chi_{eff} \ge 1.5 \cdot 10^{-3}$, что на порядок больше χ_g (см. Таблицу 4). Такой размер пятна оказывается вполне достаточным, чтобы отобрать тепло из мишени и сформировать криогенный слой (W = 200 мкм) за время менее 15 секунд внутри оболочек как BT-2, так и BT-2а типа (см. Главу 2, § 3).

Полученные результаты демонстрируют перспективность применения метода FST для создания специализированного модуля формирования FST-MФ-HiPER (см. Приложение 7) для частотного производства и доставки бесподвесных сферических криогенных мишеней для проведения экспериментов на установке HiPER [6, 10-12].

Литература

- I.V.Aleksandrova, S.V. Bazdenkov, V.I. Chtcherbakov. *Rapid fuel layering inside moving free-standing ICF targets*. Proceedings of SPIE. 4424, 197, 2001; I.V.Aleksandrova, S.V. Bazdenkov, V.I. Chtcherbakov. *Rapid fuel layering inside moving free-standing ICF targets: physical model and simulation code development*. Laser Particle Beams, 20, 13, 2002
- I.V.Aleksandrova, S.V.Bazdenkov, V.I.Chtcherbakov, et al. *Extension of Free-Standing Target Technologies on IFE Requirements*. in: Inertial Fusion Science and Application, State of the art 2001 (ELSEVIER), 762, 2002

- I.V. Aleksandrova., S.V. Bazdenkov, V.I. Chtcherbakov. Integrated FST-layering code for the optimization of fuel ice formation in moving ICF / IFE capsules. 27-ая Европейская конференция по Взаимодействию Лазерного излучения с Веществом (XXVII European conference on Laser Interaction with Matter, 7-11 октября 2002 г., Москва, Россия)
- 4. I.V.Aleksandrova, S.V.Bazdenkov, V.I.Chtcherbakov, et al. *An efficient method of fuel ice formation in moving free standing ICF / IFE targets*. J.Phys.D: Appl.Phys. **37**, 1163, 2004
- I.V.Aleksandrova, E.R.Koresheva, I.E.Osipov, et al. Cryogenic fuel targets inertial fusion: Optimization of fabrication and delivery conditions. J.Russian Laser Research 28, N3, 207, 2007
- 6. I.V.Aleksandrova, A.A.Belolipetskiy, V.A.Kalabuhov, et al. *FST- technologies for high reprate production of HiPER scale cryogenic targets.* Proc. SPIE **8080**, 80802M, 2011
- S.Atzeni1, C. Bellei1, A. Schiavi. *Target studies for the HiPER project*. Proceed. 34th EPS Conference on Plasma Phys. (Warsaw, 2 - 6 July 2007)
- 8. H. M. Roder, G. E. Childs, R. D. Mc Carty, P. E. Angerhoier. *Survey of the properties of the hydrogen isotopes below their critical temperatures*. US NBS Techn. Note N641, 1973 (US Dept. of Commerce Publ., Boulder, Colorado)
- 9. Л.Д.Ландау, Е.М.Лифшиц. Теоретическая физика. Т.1, Механика. М. Наука, 1988
- 10. I.V.Aleksandrova, A.A.Belolipetskiy, V.A.Kalabuhov, et al. *FST-technologies for high-reprate production of HiPER scale cryogenic targets.* Proceed. Workshop "HiPER: the European Pathway to Laser Energy" (Czech Rep., Prague, April 20-22, 2011)
- 11. I.V.Aleksandrova, A.A.Belolipetskiy, E.R.Koresheva, et al. *A specialized layering module for high rep-rate producing of free standing HiPER targets.* Proceed. Internationa 1 conference on Fusion Science and Applications (IFSA, France, Bordeaux, September 12-16, 2011)
- 12. И.В.Александрова, А.А.Белолипецкий, Е.Р.Корешева, и др. Оптимизация процесса FST-формирования при движении массива криогенных мишеней в спиральном вакуумном канале: математическое моделирование и эксперимент. XXXVIII международная (Звенигородская) конференция по Физике Плазмы и УТС (Моск. обл., Звенигород, 14 – 18 февраля, 2011)

Приложение 3

Тепловое пятно контакта

В данном приложении представлены результаты, полученные при изучении задачи о тепловом пятне контакта, возникающего при охлаждении тонкостенной сферической оболочки в модуле формирования. Это необходимо для оптимизации программы "Rapid_FST" по расчету времени формирования мишеней различного класса. Получена оценка площади пятна при решении задачи о тангенциальном распространении тепла через распределенные источники, которые соответствуют радиальному тепловому потоку [1].

§ 1. Охлаждение мишени с учетом тангенциальных потоков тепла вдоль оболочки

Прежде чем приступить к моделированию процесса охлаждения мишени, подчеркнем, что конкретные входные данные крайне важны при проведении расчетов. В проекте рассматриваются три различных материала оболочки: полиимид, полистирол и GDP-полимер. Однако, необходимый набор параметров имеется только для полистирола (табличные данные теплопроводности и теплоемкости и собственные данные по измерению прочности при комнатных и низких температурах) и дейтерия (табличные данные). Поэтому, при моделировании ограничимся рассмотрением пары "оболочка – топливо" в виде "полистирол – дейтерий". Поскольку теплопроводность изотопов водорода для любых фазовых состояний значительно больше теплопроводности оболочки из полистирола, то температурными градиентами в мишени можно пренебречь. Действительно, теплопроводность полистирола к изменяется от 0.029 Вт/мК при 4.2 К до 0.074 при 20 К (см. Таблицу 2), тогда как для п-D₂ теплопроводность в этом температурном интервале составляет 0.46-0.3 Вт/мК [2,3], то есть на порядок больше. Учтем также, что мишень при ее движении по каналу вращается, и топливо внутри оболочки перемешивается. Другими словами, модель процесса охлаждения основывается на предположении, что температурными градиентами в мишени можно пренебречь. Между тем тепловыми потоками вдоль поверхности оболочки пренебречь нельзя. Учет их приводит к эффективному расширению пятна контакта и существенному уменьшению времени охлаждения мишени.

• Модельная задача. Характерные параметры охлаждения тонкой оболочки можно продемонстрировать на примере решения одномерной задачи охлаждения однородного стержня с начальной температурой T, на одном конце которого поддерживается постоянная температура T_{cool} , что соответствует точечному контакту и распределению температуры вблизи него (отношение площади контакта к поверхности оболочки является малой величиной: ~ 10^{-4} – см. Приложение 2).

Если обмен с окружающей средой отсутствует, и в системе нет источников внутреннего тепла, то уравнение теплопроводности для температуры u(x,t) записывается в виде:

$$u_t = \alpha^2 u_{xx}$$
$$\alpha^2 = \frac{\kappa}{c\rho}$$

Здесь *а*² - коэффициент температурной проводимости, *с* – теплоемкость и *р* - плотность полистирола. Уравнение дополняется следующими начальными и граничными условиями:

$$u(x,0) = T$$

 $u(0,t) = T_{cool}$

Решение ищется в виде суммы двух членов:

$$u(x,t) = u_1(x,t) + u_2(x,t)$$

Первый член, $u_1(x,t)$, описывает влияние начального условия, а второй член, $u_2(x,t)$, задает влияние границы:

$$u_1(x,0) = T,$$
 $u_1(0,t) = 0$
 $u_2(x,0) = 0,$ $u_2(0,t) = T_{cool}$

Решение находится с помощью использования функции точечного источника. Используя ряд интегральных преобразований, распределение температуры задается в следующей форме:

$$u = T_{cool} + (T - T_{cool}) \Phi\left(\frac{x}{2\sqrt{\alpha^2 t}}\right)$$
$$\Phi(z) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^z e^{-\xi^{-2}} d\xi$$

Далее проводились численные расчеты для параметров, типичных для полистирола (брались значения, усредненные по соответствующим температурным интервалам). Результаты расчетов представлены на Рис. 1. Для приведенного графика $T_{cool} = 4.2$ K, T = 18 K. Видно, что через 1 секунду температура опускается ниже 6 K (т.е. приближается к температуре T_{cool}) на расстоянии от центра охлаждения ~ 200 мкм, что позволяет говорить об эффективном пятне контакта χ_{eff} , которое значительно превосходит геометрическое.

Таким образом, поскольку характерные времена охлаждения мишеней по методу FST составляют 10 сек и более [1], модельная задача показывает, что распространение тепла по поверхности оболочки является существенным и должно учитываться при расчете времени формирования топливного слоя.



Рис.1. Распределение температуры при удалении от пятна контакта.

На следующем этапе моделирования учтем теплообмен с внутренними слоями мишени, в результате которого и происходит вымораживание топлива. Это влияние можно описать с помощью введения поверхностных источников отбора тепла. Тогда в уравнении теплопроводности для охлаждения оболочки появится дополнительный член, соответствующий плотности тепловых источников, и зависящий от разницы температур $u(x,t) - \theta$, где θ - температура внутри мишени.

$$c\rho u_{t} = \kappa u_{xx} - h(u - \theta)$$
$$u_{t} = \alpha^{2} u_{xx} - \beta(u - \theta)$$
$$\alpha^{2} = \frac{\kappa}{c\rho}, \quad \beta = \frac{h}{c\rho}$$

Здесь член $h(u - \theta)$ задает количество тепла, отбираемого оболочкой от топлива (рассчитано на единицу длины и времени). Параметр h определяется при учете теплового обмена с топливом за счет радиальных градиентов температуры с характерным пространственным параметром Δr , минимальное значение которого соответствует толщине оболочки. Этот параметр уточняется при численных расчетах самосогласованным образом. Для удобства определения h мы также вводим параметр \hat{S} , задающий площадь поверхности, через которую происходит обмен. С учетом введенных параметров, тепловой баланс записывается в виде:

$$Q dt = k \frac{\hat{S}}{\Delta r} (u - \theta)$$

Плотность теплоты определяется нормировкой к объему топлива, участвующего в обмене ($V = S\tilde{r}$, где \tilde{r} толщина топливного слоя):

$$Q dt/dV = k \frac{S}{\Delta r} (u - \theta)/dV$$

Отсюда параметры *h* и *β* определяется как:

$$h = \frac{k}{\Delta r \ \tilde{r}}$$
, $\beta = \frac{\alpha^2}{\Delta r \ \tilde{r}}$

По-прежнему, если мы интересуемся распределением температуры около точки охлаждения (или точки контакта теплой мишени с холодной стенкой канала формирования), можно воспользоваться решением для полу ограниченного стержня в соответствующих временных и пространственных интервалах. Начальные и граничные условия остаются прежними. Решение ищется в виде:

$$u(x,t) = \exp(-\beta t) v(x,t)$$

Тогда для функции и получается уравнение теплопроводности в каноническом виде

 $v_t = \alpha^2 v_{xx} + f(t)$, $f(t) = \beta \theta \exp(\beta t)$, но с граничным условием, зависящим от времени:

$$v(x,0) = T$$

$v(0,t) = T_{cool} \exp(\beta t) = \mu(t)$

Решение можно представить в виде суммы 3-х членов: v_1 и v_2 , представляющие решение однородного уравнения и описывающие влияние начального и граничного условий, соответственно, и u_3 , дающего решение неоднородного уравнения, и удовлетворяющего нулевым граничным и начальным условиям.

 $v(x,t) = v_1(x,t) + v_2(x,t) + v_3(x,t)$

$$\begin{split} v_1(x,0) &= T, & v_1(0,t) = 0 \\ v_2(x,0) &= 0, & v_2(0,t) = \mu(t) \\ v_3(x,0) &= 0, & v_3(0,t) = 0 \end{split}$$

Выполняя ряд интегральных преобразований, распределение температуры по поверхности оболочки можно представить в следующем виде, удобном для численных расчетов:

 $u = u_1 + u_2 + u_3$ $u_1 = T\Phi(\frac{x}{2\sqrt{\alpha^2 t}})e^{-\beta t}$ $\Phi(z) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^z e^{-\xi^2} d\xi \qquad z = \frac{x}{2\sqrt{\alpha^2 t}}$



Рис. 2. Тепловое "расплывание" контактного пятна. Рассматривается пара "оболочка – топливо" в виде "полистирол – дейтерий" для мишени типа BT-2.

■ Решение модельной задачи. На Рис. 2 приведены графики распределения температуры по поверхности мишени от точки контакта оболочки со стенкой канала формирования. При учете радиального отбора тепла на охлаждение мишени, распределение температуры по поверхности оболочки очень быстро стабилизируется. Это происходит в течение времени ~ 0.1 сек, что значительно меньше характерных времен формирования мишени (10 секунд и более в зависимости от дизайна мишени [1]).

Сформулируем основные выводы:

1) Область распределения температуры от точки контакта по оболочке является значительной (по сравнению с геометрическим размером пятна контакта) и существенным образом влияет на скорость охлаждения мишени.

2) Поскольку это распределение температуры слабо зависит от времени (наступает быстрая стабилизация), появляется возможность разбить задачу на 2 этапа: перенос тепла в тангенциальном и радиальном направлениях, соответственно, и ввести эффективный параметр контакта χ_{eff} , учитывающий «тепловое» расплывание пятна контакта за счет тангенциальных потоков тепла. Его значение зависит от начальной температуры мишени и от хода процесса охлаждения оболочки с топливом, что позволяет проводить оптимизацию формирования мишени по методу FST.

В качестве примера в следующем параграфе приведем результаты расчета по времени формирования для мишени класса HiPER с оболочкой типа BT-2.

§ 2. Время формирования мишени типа ВТ-2

Для расчета времени формирования мишени ВТ-2 методом FST необходимо знание следующих ее параметров:

■ Прочностные свойства оболочки

- модуль Юнга (для расчета геометрического пятна контакта)

 прочность оболочки на растяжение (для расчета температуры разгерметизации и начальной температуры входа мишени в канал формирования)

■ Теплофизические свойства оболочки

 теплопроводность и теплоемкость (для расчета теплового пятна контакта и времени остывания оболочки)

Теплофизические свойства топлива (для расчета времени формирования слоя).

Учитывая сказанное выше относительно важности входных данных по свойствам материалов, проведем расчеты времени формирования для мишени ВТ-2, геометрические параметры которой, а также материалы внешнего и топливного слоев указаны в Таблице 1.

Дополнительно в Таблице 2 представлены теплофизические свойства полистирола (теплоемкость и теплопроводность) в широком диапазоне температур: 1÷ 300 К [3]. Модуль Юнга для полистирола (ρ_{sh} = 1.05 г/см³) изменяется в пределах E = 1.0÷3.8 ГПа [3]. Теплофизические свойства дейтерия можно найти в работе [2].

Мишень типа	Внешни	й слой	Топливный слой		
BT-2	(полистирол)		(дейтерий)		
Внешний радиус	1047	МКМ	1044	МКМ	
Толщина слоя	3	МКМ	211	МКМ	
Внутренний радиус	1044	МКМ	833	МКМ	

Таблица 1. Геометрические параметры мишени ВТ-2.

Т, К	<i>к</i> , Вт/м·К	Т, К	С, Дж/кг•К
1	0.011	5	10.05
4.2	0.029	10	32.16
10	0.0541	20	102.11
20	0.0744	30	170.45
30	0.0863	40	226.73
40	0.0947	50	270.55
50	0.1012	60	311.95
60	0.1066	70	346.52
70	0.1111	80	381.50
80	0.1150	90	420.49
90	0.1184	100	460.24
100	0.1231	120	523.00
150	0.1326	140	594.13
200	0.1407	160	661.07
250	0.1472	180	728.02
300	0.1539	200	799.14

Таблица 2. Теплопроводность и теплоемкость полистирола в широком диапазоне температур [3].

Вопрос, связанный с выбором оптимальной температуры входа мишени в канал формирования T_{in} , связан с определением верхнего значения температуры разгерметизации T_d мишенного контейнера. По результатам исследований, проведенным в ФИАН, показано, что значение прочности полистирола на растяжение для оболочек, изготовленных методом вспенивания [4], составляет $\sigma \sim 20$ ÷30 МПа при 300 К и 70÷100 МПа при 60 К.



Рис. 3. Температура разгерметизации оболочки ВТ-2 в зависимости от ее прочности.

Таким образом, при криогенных температурах для оболочек из полистирола максимальное значение σ составляет 100 МПа. Тогда требуемое снижение давления (исключающее как разрушение микросферы внутренним давлением, так и утечку топлива из оболочки вследствие обратной диффузии) может быть достигнуто только при ожижении топлива в мишенном контейнере ($T_d = 31.1$ K, см. Рис. 3). Это означает, что начальным фазовым состоянием топлива в оболочке является двухфазное состояние "жидкость+пар".

Осуществление других вариантов невозможно из-за низкой прочности оболочки. Поэтому в этом случае величина оптимальной температуры входа мишени в канал формирования выбирается близкой температуре разгерметизации, т.е. $T_{in} = 31.0 \text{ K} \sim T_d$, чтобы реализовать максимальное время для симметризации слоя.

Две стадии будут важными при формировании мишени:

- 1) Первая стадия охлаждение мишени от $T_{in} = 31.0$ К до температуры T_{tp} (τ_{liquid}),
- 2) Вторая стадия вымораживание слоя при $T = T_{tp}$ (τ_{solid}).

Пятно контакта	Геометрическое пятно контакта, χ_g	Эффективное пятно контакта (геометрическое + тепловое), χ_{eff}	
	7.6x10 ⁻⁴	Первая стадия	Вторая стадия
Параметр χ		17.9x10 ⁻⁴	15.6x10 ⁻⁴

Таблица 3. Пятно контакта (параметр х).

Результаты расчетов приведены в Таблицах 3 и 4. При этом использовалась программа "Rapid_FST", оптимизированная для расчета времени формирования мишеней класса *HiPER*. Геометрическое пятно контакта определялось для канала формирования с максимальным диаметром намотки цилиндрической спирали равным 60 мм.

Величина R_{eff} (радиус эффективного пятна контакта) для Таблицы 4 рассчитывалась согласно соотношению $R_{eff} = D \sqrt{\chi_{eff}}$, где D – диаметр мишени.

Таблица 4. Время формирования мишени ВТ-2.

FST метод	Пятно контакта (эфф.)	$ au_{liquid}$	$ au_{solid}$	Время формирова- ния
Первая стадия	$R_{eff1} = 88.6$ мкм	6.04 сек		$\tau_{form} =$
Вторая стадия	$R_{tff2} = 82.7$ мкм		3.97 сек	10.01 сек

Таким образом, приведённые оценки показывают, что в условиях FST эксперимента для мишени BT-2 с оболочкой из полистирола образуются пятна контакта (геометрическое + тепловое) с размером $\chi_{eff} \ge 1.5 \cdot 10^{-3}$, а соответствующее время формирования криогенного слоя составляет $\tau_{form} \sim 10$ сек (см. Таблицу 4) [1].

Литература

- 1. I.V.Aleksandrova, A.A.Belolipetskiy, V.A.Kalabuhov, et all. *FST- technologies for high reprate production of HiPER scale cryogenic targets*. Proceed. SPIE **8080**, 80802M, 2011
- H. M. Roder, G. E. Childs, R. D. Mc Carty, P. E. Angerhoier. Survey of the properties of the hydrogen isotopes below their critical temperatures. US NBS Techn. Note N641, 1973 (US Dept. of Commerce Publ., Boulder, Colorado)
- 3. <u>http://aries.ucsd.edu/pulsifer/PROPS/mech_solid_hydrgn.shtml</u> (Database information library of UCLA)

Приложение 4

Фазовое состояние топлива перед началом FST-формирования твердого криогенного слоя внутри полой сферической оболочки

В данном разделе будет рассмотрен вопрос, связанный с начальным фазовым состоянием топлива в оболочке непосредственно перед началом формированием слоя. Отметим, что этот вопрос, хотя и опосредованно, связан с выбором оптимальной температуры входа мишени в канал формирования T_{in} , которая является одним из оптимизационных параметров метода FST.

Важнейшим аспектом деятельности при разработке технологии производства мишеней является создание физической модели, описывающей процессы формирования конденсированных слоев топлива на внутренней поверхности полимерной оболочки. За основу при решении этой задачи взят метод FST. Следует подчеркнуть, что технология производства криогенных слоев согласно указанному методу может иметь особенности в зависимости от того, в каком начальном фазовом состоянии находится топливо. Сказанное выше означает, что с учетом различных скоростей охлаждения мишени, предстоит рассмотреть все возможности, определяемые T-S диаграммой:

Базообразное состояние \rightarrow Работа с начальной газовой фазой будет возможна, если сброс давления в мишенном контейнере можно осуществить при температурах выше критической $T_d > T_{cp}$, причем существенную роль будет играть величина превышения температуры над критической изотермой. Расчеты, проведенные для мишеней класса HiPER [1], показали, что сбросить давление в мишенном контейнере без разрушения оболочек, и при условии, что топливо находится в газообразном состоянии, возможно лишь при использовании высокопрочных полимерных оболочек (см. также Главу 3, § 3.2). В противном случае величина T_{in} может оказаться даже меньше температуры T_s , где T_s - температура начала разделения на жидкую и газообразную фазы.

- **Бритическое состояние** \rightarrow соответствует области вблизи критической точки $T \approx T_{cp}$
- **Жидкое состояние** \rightarrow соответствует области сжатой жидкости $T_s < T < T_{cp}$
- **Двухфазное состояние** \rightarrow "жидкость + пар" $T < T_s$

Для анализа возможных ситуаций удобно ввести параметр θ , определяемый отношением:

$$\theta = \frac{\rho_f}{\rho_{cp}},$$

где ρ_f плотность газа при заполнении оболочки, а ρ_{cp} величина критической плотности для заданного топливного вещества.

При формировании мишени по методу FST, особое внимание следует уделить поведению границы раздела фаз внутри оболочки между жидкостью и паром при различных значениях параметра θ . На Рис. 1, 2 и 3 представлены результаты серии таких экспериментов. Использование в этих экспериментах именно водорода обусловлено следующими факторами: 1) изучаемые явления не зависят от вида топлива, 2) время заполнения оболочек водородом наименьшее по сравнению с другими изотопами, 3) водород – наиболее дешевый изотоп. Отметим, что во всех экспериментах точность измерения температуры в области размещения датчика составляла 0.05 К. Исследования проведены для широкого спектра значений плотности водорода внутри оболочки.

Рассмотрим следующую серию экспериментов:

• Эксперимент 1 (Рис. 1): Поведение границы раздела "жидкость – пар" при $\theta < 1$. Оболочка из полистирола (Ø 940 мкм) заполнена H₂ при T = 300 K до давления P = 305 атм. Плотность H₂ существенно ниже величины критической плотности. Изохора формирования соответствует $\theta = 0.69$. Начальное фазовое состояние \rightarrow "жидкость + пар" (кадр 1). По мере нагрева оболочки, количество жидкой фазы уменьшается, а диаметр паровой полости возрастает. Конечное фазовое состояние – газ (кадр 5). Граница раздела фаз во всем диапазоне температур хорошо определена и локализована в пространстве.

• Эксперимент 2 (Рис. 2): Поведение границы раздела "жидкость – пар" при $\theta > 1$. Оболочка из полистирола (Ø 940 мкм) заполнена H₂ при T = 300 K до давления P = 765 атм. Плотность H₂ существенно выше величины критической плотности. Изохора формирования соответствует $\theta = 1.32$. Начальное фазовое состояние \rightarrow "жидкость + пар" (кадр 1). По мере нагрева оболочки, количество жидкой фазы растет, а диаметр паровой полости уменьшается. Конечное фазовое состояние – сжатая жидкость (кадр 6). Граница раздела фаз во всем диапазоне температур хорошо определена и локализована в пространстве.

• Эксперимент 3 (Рис. 3): Поведение границы раздела "жидкость – пар" при $\theta \sim 1$. Оболочка из полистирола (Ø 940 мкм) заполнена H₂ при T = 300 K до давления P = 445 атм. Плотность H₂ близка к критической плотности (так называемая критическая мишень). Изохора формирования соответствует $\theta = 0.91$. Начальное фазовое состояние \rightarrow "жидкость + пар" (кадр 1). По мере нагрева оболочки, форма границы "жидкость – пар" претерпевает резкие изменения: от сильно вогнутой при T = 14 K (чуть выше температуры тройной точки T_{tp} = 13.97K, кадр 1) до почти плоской при T = 33 K (чуть ниже критической температуры T_{cp} = 33.19 K, кадр 3). Граница раздела фаз во всем диапазоне температур хорошо определена и локализована в пространстве. Отметим, что плоский мениск на кадре 3 указывает на одинаковую упорядоченность двух фаз в критической точке, т.е. на одинаковые свойства вещества по обе стороны границы раздела.

Сделаем несколько важных замечаний, касающихся проведенных экспериментов:

1) Прежде всего, подчеркнем, что во всех трех случаях нагрева оболочки (Рис. 1, 2 и 3) поведение границы раздела фаз зависит от параметра θ , но во всем диапазоне изменения температур эта граница хорошо определена и локализована в пространстве.

2) При формировании мишени по методу FST, процесс пойдет в обратном направлении \rightarrow оболочка будет быстро охлаждаться с аналогичной динамикой газовой полости: начиная от больших номеров кадров по направлению к кадру №1. При этом в случае $\theta > 1$, процесс разделения фаз начинается с образования пузырька пара внутри более плотной гомогенной фазы (сжатой жидкости), и при дальнейшем охлаждении пузырек будет только увеличиваться

в диаметре. Такое поведение границы раздела "жидкость – пар" при охлаждении оболочки будет типичным для мишеней класса HiPER как для BT-2, так и для BT-2а оболочек.

Случай $\theta < 1$ является типичным примером образования внутри оболочки слоя жидкого водорода по механизму пленочной конденсации. Начальное фазовое состояние топлива – газ. По мере охлаждения оболочки ($T < T_s$), количество жидкой фазы возрастает, а диаметр газовой полости уменьшается.

Резюме. Приведенные результаты экспериментов демонстрируют различную динамику газовой полости при формировании мишени, имеющей различное начальное фазовое состояние топлива, например, жидкое или газообразное. Это различие не может оказать существенного значения на время формирования мишени. А вот процесс симметризации слоя вполне может иметь особенности, которые должны быть учтены при разработке FST– технологий для мишеней различного класса (например, при использовании каналов формирования в виде двойной спирали) [2, 3].

Теперь перейдем к рассмотрению особенностей динамики газовой полости при $\theta = 1$. В этом случае существуют отличия при проведении экспериментов по нагреву (Рис.3) и охлаждению (Рис.4) оболочки с водородом. На Рис. 3 форма границы раздела фаз"жидкость – пар" меняется от сильно вогнутой до почти плоской, но во всем диапазоне изменения температур эта граница хорошо определена и локализована в пространстве..

Обратимся к экспериментам, представленным на Рис. 4. Оболочка из полистирола (\emptyset 940 мкм) заполнена H₂ при T = 300 K до давления P = 445 атм. Плотность H₂ близка к критической плотности. Изохора формирования соответствует θ = 0.91. Начальное фазовое состояние \rightarrow газ (кадр 1). По мере быстрого охлаждения оболочки, при переходе через критическую точку наблюдается явление капельной конденсации в объеме (причем с элементами критических явлений). Хорошо видна критическая опалесценция (кадр 2, мениск отсутствует), а также последующее образование крупных пузырьков пара за счет слияния малых. Граница раздела фаз становится распределенной по всему объему и не имеет четкой формы и локализации.

Такое поведение водорода объясняется свойствами вещества при $\theta \approx 1$, т.е. при $\rho \approx \rho_{cp}$. Переход между жидкостью и газом в критической точке относится к переходам высших порядков, т. е. переходам порядок – беспорядок, или критическим явлениям. Хорошо известно, что при приближении к критической точке плотности жидкости и газа сравниваются. При этом сама система характеризуется наличием долгоживущих флуктуаций плотности. При охлаждении системы она уходит от критического состояния именно в точках таких флуктуаций. Граница раздела фаз становится распределенной по всему объему и не имеет четкой формы и локализации в пространстве \rightarrow мениск отсутствует (более детально см. Главу 2, п. 4.2. "Критическая мишень").

Отметим, что явления в критической точке обладают определенным гистерезисом, т.е. наблюдаются и вблизи критической точки, но при условии более резкого воздействия на систему (большие скорости охлаждения) [4].



Рис. 1. Поведение границы раздела "жидкость – пар" при $\theta < 1$. Оболочка из полистирола (Ø940 мкм) заполнена H_2 при T = 300 К до давления P = 305 атм. Плотность H_2 существенно ниже величины критической плотности. Изохора формирования соответствует $\theta = 0.69$. Начальное фазовое состояние \rightarrow "жидкость + пар" (кадр 1). По мере нагрева оболочки, количество жидкой фазы уменьшается, а диаметр паровой полости возрастает. Конечное фазовое состояние – газ (кадр 5). Граница раздела фаз во всем диапазоне температур хорошо определена и локализована в пространстве.



Рис. 2. Поведение границы раздела "жидкость – пар" при $\theta > 1$. Оболочка из полистирола (Ø940 мкм) заполнена H_2 при T = 300 K до давления P = 765 атм. Плотность H_2 существенно выше величины критической плотности. Изохора формирования соответствует $\theta = 1.32$. Начальное фазовое состояние \rightarrow "жидкость + пар" (кадр 1). По мере нагрева оболочки, количество жидкой фазы растет, а диаметр паровой полости уменьшается. Конечное фазовое состояние – сжатая жидкость (кадр 6). Граница раздела фаз во всем диапазоне температур хорошо определена и локализована в пространстве.



Рис. 3. Поведение границы раздела "жидкость – пар" при $\theta \sim 1$. Оболочка из полистирола (Ø940 мкм) заполнена H_2 при T = 300 K до давления P = 445 атм. Плотность H_2 близка к критической плотности (так называемая критическая мишень). Изохора формирования соответствует $\theta = 0.91$. Начальное фазовое состояние \rightarrow "жидкость + пар" (кадр 1). По мере нагрева оболочки, форма границы "жидкость – пар" претерпевает резкие изменения: от сильно вогнутой при T = 14 K (чуть выше температуры тройной точки Ttp = 13.97 K, кадр 1) до почти плоской при T = 33 K (чуть ниже критической температуры T сp = 33.19 K, кадр 3). Граница раздела фаз во всем диапазоне температур хорошо определена и локализована в пространстве.

167



Рис.4. Поведение границы раздела "жидкость – пар" при $\theta \sim 1$. Оболочка из полистирола (Ø940 мкм) заполнена H_2 при T = 300 K до давления P = 445 атм. Плотность H_2 близка к критической плотности (так называемая критическая мишень). Изохора формирования соответствует $\theta = 0.91$. Начальное фазовое состояние \rightarrow газ (кадр 1). По мере быстрого охлаждения оболочки (q = 0.2 - 0.01 K/cek), при переходе через критическую точку наблюдается явление капельной конденсации в объеме (причем с элементами критических явлений). Хорошо видна критическая опалесценция (кадр 2, мениск отсутствует), а также последующее образование крупных пузырьков пара за счет слияния малых. Граница раздела фаз становится распределенной по всему объему и не имеет четкой формы и локализации.

Таким образом, переход вещества из однофазного в двухфазное состояние в условиях быстрого охлаждения при $\rho \approx \rho_{cp}$ может происходить через явление капельной конденсации в объеме оболочки. Реализуется следующая закономерность: чем ближе плотность газа внутри оболочки к критической плотности, тем меньшие скорости охлаждения требуются для инициации этого процесса. Ниже мы поясним важность полученных результатов.

В экспериментах по формированию слоя в ультрадисперсном состоянии [3,5-7] была обнаружена определенная корреляция между эффектом образования прозрачного слоя и протеканием процесса капельной конденсации в объеме оболочки. Данный процесс облегчает условия формирования ультрадисперсных гомогенных сред и, в частности, формирование ультрадисперсного слоя топлива в присутствии примесей (легирующих добавок). Это объясняется следующими факторами:

(a) процесс капельной конденсации способствует равномерному распределению добавок по объему жидкого топлива (особенно важно для эквимолярной DT смеси, а также альтернативного топлива с пониженным содержанием трития $\rightarrow 20\%$ и менее [8,9]),

(б) как следствие, в равномерном поле добавок реализуются условия для инициации массового роста дислокаций по всему слою, препятствующих образованию крупно кристаллической фазы.

Полученные таким образом слои обладают повышенной механической и тепловой устойчивостью [10-14] (см. Рис. 5). Это является важным фактором с точки зрения сохранения качества слоя при его инжекции в мишенную камеру [3,7,15, 16].



Рис. 5. Качественная зависимость механической прочности σ от размера зерна d .

Выживаемость водородных топливных слоев, подверженных внешнему воздействию, зависит от структуры слоя. В работах [17,18] обнаружено, что анизотропия в скорости распространения звука присуща hcp- фазам H_2 и D_2 (дейтерий входит в DT смесь), и для H_2 и D_2 составляет около 20% (продольный звук) и 33% (поперечный звук). В равновесном состоянии твердые изотопы водорода состоят из анизотропных молекулярных кристаллов. В соответст-

вии с теорией Дебая, решеточная теплопроводность твердого тела прямо пропорциональна величине скорости звука.

Поэтому, даже при условии равномерного нагрева мишени, возникает различие в радиальном градиенте температуры на поверхности криогенного слоя в случае анизотропного топлива. Это является причиной сферически ассиметричной сублимации топливного вещества и приводит к росту шероховатости слоя и его разнотолщинности [3,7,15,16].

Приведем результаты расчетов, выполненных для мишени «Накаи» [19]: сферическая оболочка из полистирола Ø = 4 мм и толщиной стенки 45 мкм, содержащая слой твердого топлива толщиной 200 мкм. На мишень падает однородный тепловой поток излучения от горячих стенок камеры реактора SOMBRERO $T_0 = 1758$ К [20-22]. Тепловой поток, поглощенный в материале мишени, составляет от $J = 5.0 \text{ до } 0.5 \text{ Bt/cm}^2$, температура инжекции мишени варьировалась в пределах Т =10 - 18 К.

Таблица 1. Время (мсек)* нарастания шероховатости слоя в зависимости от степени его анизотропии ξ при различных значениях величины Ј.

$J = 5 BT/cm^2$		$J = 0.5 BT/cm^2$		
D_2	DT	D ₂	DT	
11.7	9.8	27.6	23.0	
6.4	5.4	15.4	13	
4.7	4.0	11.5	9.7	
3.0	2.6	7.6	6.5	
2.4	2.0	6.1	5.1	
2	2 1.7		4.4	
	$J = 5$ D_2 11.7 6.4 4.7 3.0 2.4 2	$J = 5 BT/CM^{2}$ $D_{2} DT$ $11.7 9.8$ $6.4 5.4$ $4.7 4.0$ $3.0 2.6$ $2.4 2.0$ $2 1.7$	$\begin{array}{c c c c c c c c c c c c c c c c c c c $	

Таблица 2. Время (мсек)* нарастания шероховатости слоя в зависимости от степени его анизотропии ξ при различных значениях величины T_{in}.

	DT						
ξ, %	Температура инжекции						
	10 K	12 K	14 K	16 K	18 K		
7	8.3	10.5	12.9	16.2	21.0		
8	7.7	9.7	11.9	15	19.5		
9	7.2	9.1	11.1	14	18.3		
10	6.8	8.6	10.5	13.3	17.3		
20	4.6	5.8	7.1	9.0	11.9		
$*/I = 0.5 P_{T}/c_{0}c^{2}$							

*/T = 10 K

f/J = 0.5 BT/cm

Данные, представленные в Таблице 1, обнаруживают следующую тенденцию: скорость роста шероховатости слоя тем меньше, чем ниже уровень анизотропии слоя. Для более детального анализа отметим, что минимальное время полета мишени в камере (время инжекции Δt_{cc}) определяется отношением радиуса камеры (6.5 м для реактора типа SOMBRERO) к максимально реализуемой практически скорости инжекции (~ 400 м/сек). Это время составляет примерно 16 мсек. Если время Δt_{rough} роста шероховатости на поверхности слоя больше минимального времени инжекции (16 мсек), то качество поверхности слоя будет сохраняться в процессе инжекции. Таким образом, следующее соотношение гарантирует выживание слоя в процессе доставки мишени в фокус мощной лазерной установки:

 Δt_{rough} должно превышать Δt_{cc} .

Такое условие позволяет сделать следующие заключения (см. Таблицу 2):

■ Криогенный слой с анизотропией *ξ*₁ ≥ 10% даже при относительно низком уровне поглошенного тепла $J = 0.5 \ Bm/cm^2$ деградирует вследствие роста его шероховатости еще до момента прихода инжектированной мишени в центр реакторной камеры (даже при максимальной скорости инжекции в 400 м/сек).

• Для анизотропного слоя при $\xi_1 = 7 - 9\%$ остается единственная возможность: инжекция мишени при T = 18 К. Однако при этом величина T становится близкой к температуре $T_{cc} = 18.5$ К, при которой мишень с твердым DT-слоем должна достичь центра реакторной камеры. Другими словами, это означает, что мишень должна инжектироваться в камеру со скоростью около 400 м/сек. При этом габариты инжектора должны быть значительно увеличены за счет увеличения длины ускорения, ибо в противном случае мишень будет разрушена под действием значительных механических перегрузок. Для справки: на стадии ускорения мишени в инжекторе перегрузки возникают за счет превышение ускорения мишени a над ускорением свободного падения g.

Отметим, что в случае, когда дизайн реакторной камеры включает остаточный газ, инжектированная мишень подвергается не только тепловому излучению стенок камеры, но и конвективному нагреву со стороны горячего газа. В этих условиях проблема выживания инжектированной мишени становится еще более сложной.

В противоположность анизотропному кристаллическому криогенному слою топлива, экстремально высокие скорости охлаждения (FST метод) позволяют сформировать предельно разупорядоченные структуры с большой плотностью дефектов, т.е. изотропную среду, или ультрадисперсные криогенные слои из изотопов водорода. Неотъемлемым свойством таких слоев является их повышенная способность к выживанию в условиях процесса доставки мишени в центр реакторной камеры. Их можно отнести к классу слоев, обладающих свойством самосохранения, имея в виду их высокую механическую и тепловую устойчивость. Это имеет первостепенное значение при ускорении и инжекции готовой мишени.

Литература

- 1. I.V.Aleksandrova, A.A.Belolipetskiy, V.A.Kalabuhov, et al. *FST- technologies for high rep-rate production of HiPER scale cryogenic targets.* Proc. SPIE **8080**, 80802M, 2011
- I.V.Aleksandrova, E.R.Koresheva, E.L.Koshelev, I.E.Ospov. *Pilot Target Supply System Based* on the FST Technologies: Main Building blocks, Layout Algorithms and Results of the Testing *Experiments*. Plasma and Fusion Research (the Japan Society of Plasma Science and Nuclear Fusion Research) 8, N2, 3404052, 2013
- 3. I.V.Aleksandrova, E.R.Koresheva, I.E.Ospov, et al. *Ultra-fine fuel layers for application to ICF/IFE targets*. Fusion Sci.Technol., **63**, 106, 2013
- 4. Дж. Карери. Порядок и беспорядок в структуре материи. Издательство "МИР", 228 стр., 1985
- E.R.Koresheva, I.E.Osipov, T.P.Timasheva, L.S. Yaguzinskiy. *The issue of homogeneous solid H₂- layers formation inside free-standing microshells*. in: Inertial Fusion Science and Application, State of the art 2001 (ELSEVIER) 767, 2002

- 6. E.R.Koresheva, I.E.Osipov, T.P.Timasheva, L.S.Yaguzinskiy. A new approach to form transparent solid layer of hydrogen inside a microshell: application to inertial confinement fusion. J.Phys.D: Appl.Phys. **35**, 825, 2002
- I.V.Aleksandrova, A.A.Belolipetskiy, E.R.Koresheva et al. *Insight into the Relation between the Fuel Microstructure and IFE Targets Response under Their Fabrication, Injection and Transport through the Reaction chamber.* Proceed. the 1st Conference on Laser Inertial Fusion Energy (CLIFE, Yokohama, Japan, April 26 27, 2012)
- 8. S.Kawata, H. Nakashima. *Tritium content of a DT pellet in inertial confinement fusion*. Laser Part. Beams, **10**, 479, 1992
- 9. S. Eliezer, Z.Henis, J.M.Martinez-Val, I.Vorobeichik. *Effects of different nuclear reactions on internal tritium breeding in deuterium fusion*. Nuclear Fusion, **40**, 195, 2000
- 10. M. J. Petch. The cleavage strength of polycrystals. J. Iron Steel Inst. 174, N5, 25, 1953
- 11. И.Д.Морохов, Л.И.Трусов, В.Н.Лаповик. *Физические явления в ультрадисперсных материалах*. М.: Наука, 1984, 245 стр.
- 12. Л.А.Алексеева, В.Д.Нацик, Р.В.Ромашкин и др. Пластичность и прочность кристаллов нормального водорода (*n*-*H2*), *допированных азотом*. Физика твердого Тела **48**, N8, 1428, 2006
- 13. J.P.Frank, R.Wanner. *Elastic constants of hcp He*⁴. Phys.Rev.Lett. 25, N6, 345,1970
- 14. S.Landolt-Bornstein. *Elastic, piezoelectric and related constants of crystals.* New series, Vol.III/1, R.F.S.Hearmon and K.H.Hellwege eds. (Springer verlag, New York, 1966)
- 15. I.V. Aleksandrova, A.A. Belolipetskiy, E.R. Koresheva, et al. *Thermal and mechanical responses* of cryogenic targets with a different fuel layer anisotropy during delivery process. J.Russian Laser Research **29**, N5, 419, 2008
- 16. I.V.Aleksandrova, A.A.Belolipetskiy, E.R.Koresheva, S.M.Tolokonnikov. Survivability of fuel layers with a different structure under conditions of the environmental effects: Physical concept and modeling results. Laser and Particle Beams **29**, 419, 2008
- R.Wanner, H.Meyer. Sound velocity in solid hydrogen and deuterium. Phys.Lett. 41A, N3, 189, 1972
- 18. R.Wanner, H.Meyer. Velocity of sound in solid hexagonal close-packed H2 and D2. J.Low Temp. Phys. 11, N5/6, 715,1973
- 19. Nakai S. and Miley G.N. *Physics of high power laser and matter interactions*. Word Scientific Publishing, Singapore, 1992
- 20. D.T.Goodin, N.B.Alexander, L.C.Brown et al. *Developing target injection and tracking for inertial fusion energy power plants.* Nuclear Fusion **41**, N5, 527, 2002
- 21. R.W. Petzold, D.T.Goodin, N.B.Alexander, et al. *Direct Drive Target Survival During Injection in an Inertial Fusion Energy Power Plant*. Nuclear Fusion, **42**, 1351, 2002
- 22. D.T.Goodin, N.B.Alexander, L.C.Brown et al. *Demonstrating a target supply for inertial fusion energy*. Proceed. 3rd IAEA RCM on Physics and Technology of IFE Targets and Chambers (11-13 October, 2004, Daejon, Rep.Korea), <u>http://aries.ucsd.edu</u>

Приложение 5

Метод фононной модуляции структуры

Один из основных вопросов, стоящих на сегодняшний день в исследованиях по ИТС, это влияние микроструктуры твердого топлива на качество криогенного слоя и сохранение этого качества вплоть до момента облучения мишени импульсом мощного лазерного излучения. Требования на симметрию слоя сформулированы в работе [1]: отклонения от сферичности и концентричности должны составлять не более 1%, локальные неоднородности на поверхности топливного слоя (шероховатость) не должны превышать 1мкм.

Требования к структуре оболочки и топливного слоя (исходя из физики имплозии мишени) сформулированы в работе [2]: "наши результаты свидетельствуют о том, что именно нано кристаллические слои гарантируют малые флуктуации во фронте ударной волны, что минимизирует появление опасных неустойчивостей при сжатии мишеней класса NIF". Это говорит о том, что необходимо разрабатывать методы получения криогенных мишеней с заданной структурой топливного слоя, которая отвечает перечисленным выше требованиям.

Итак, в настоящее время в мировой практике разработано несколько подходов к формированию криогенного слоя топлива. Получаемые в экспериментах слои представляют собой поликристаллическую структуру, уровень дисперсности которой зависит от применяемого метода формирования, а точнее от скорости охлаждения конденсированного топлива (см. обзорную работу [1]):

■ Общепринятый метод охлаждения DT-топлива ниже тройной точки со скоростью ~ 3•10⁻⁵ К/сек и последующей симметризацией слоя по методу β-layering (либо IR-redistribution) позволяет получить криогенный слой типа монокристалл с гладкой внутренней поверхностью, но обладающий значительной анизотропией в скорости распространения звука [3,4], которая присуща hcp- фазам H₂ и D₂ (дейтерий входит в DT смесь);

■ Увеличение скорости охлаждения жидкого топлива до (4–14) •10⁻³ К/сек приводит к формированию уже более мелкозернистой поликристаллический структуры слоя.

При этом наблюдается высокая чувствительность получаемых топливных слоев [1] к вариации внешних условий, что неизбежно приведет к деградации качества мишени в процессе ее доставки в реакторную камеру.

Получение термостойких криогенных слоев связано с переходом к методу FST, что означает, прежде всего, реализацию высоких скоростей охлаждения \rightarrow q = 1–50 K/сек. Метод FST относится к структурно – чувствительным методам, цель которого заключается именно в том, чтобы сформировать оптимальную микроструктуру топлива применительно к задачам ИТС. Экстремально высокие скорости охлаждения при наличии добавок к топливу позволяют сформировать предельно разупорядоченные структуры с большой плотностью дефектов, т.е. изотропную среду (или, т.н., ультрадисперсные слои). Такие слои относятся к классу слоев, обладающих повышенной механической и тепловой устойчивостью, что минимизирует риск потери качества слоя в процессе доставки мишени в реакторную камеру, а также на этапе сжатия при прохождени по слою 1-ой ударной волны [5].

Термин ультрадисперсный слой относится к состоянию топлива, которое характеризуется малой длиной упорядоченности микроструктуры, т.е. малым размером зерна d. В работе [6] предложена следующая классификация: субмикронный диапазон (d = 0.1 - 0.3 мкм), нано кристаллический (обычно $d \le 100$ нм), аморфное состояние (характерный размер параметра порядка ~ 1 нм). Очень часто, для субмикронного диапазона используется термин мелкозернистая структура.

В настоящей работе нас будет интересовать вопрос, относящийся к гомогенизации уже имеющейся крупно кристаллической структуры изотопов водорода (см. Рис. 1).



Рис. 1. Крупно кристаллические фазы водорода, дейтерия и 50% смеси водорода с дейтери-ем, полученные в эксперименте.

Вопрос стоит именно так: можно ли конвертировать твердую непрозрачную крупно кристаллическую структуру в прозрачный криогенный слой. Другими словами, речь идет о возможности развития структурно - чувствительных методов для объемной гомогенизации структуры твердого водородного топлива. Рис. 2 наглядно иллюстрирует предлагаемую идею для развития новых методов получения криогенных слоев требуемого качества [7-11].



Рис. 2. Новое направление в развитии методов получения качественных криогенных слоев основано на идее гомогенизации твердой структуры водородного топлива.



Диаграмма 2. Схема проведения эксперимента по фононной модуляции структуры.



§ 1. Гомогенизация крупно кристаллической структуры нормального водорода, сформированной внутри полой оболочки

Первые результаты по фононной модуляции структуры представлены на Диаграмме 1. Принцип демонстрирован при использовании твердого слоя из нормального водорода n-H2, имеющего изначально крупно кристаллическую структуру. Температура эксперимента была равна T = 4.2 К. Толщина криогенного слоя варьировалась от W = 3.9 мкм до W = 25 мкм. Следует отметить, что свое название "Impact Load Technique" (ILT) [5-9] метод получил от типа и характера нагрузки. Низкочастотная последовательность звуковых волн (1-5 Гц) возбуждалась калиброванными ударами в верхней части канала формирования, который служил цилиндрическим волноводом для передачи возмущения на мишень, расположенную в тестовой камере (см. Диаграмму 2). По мере распространения исходной звуковой волны ее параметры непосредственно в зоне расположения мишени могут меняться, что зависит от параметров канала формирования и способа фиксации мишени в тестовой камере (плоская подложка или клин). Частотно-контрастная характеристика функции передачи модуляции достигает оптимума в тестовой камере, которая работает как концентратор звуковых волн (target sound wave concentrator). Криогенная мишень находилась под воздействием (нагрузкой) 30 -60 секунд, затем нагрузка снималась. Характерные времена переходов, наблюдаемые в этой серии экспериментов, составляли 150÷600 сек [2,3,5-9]. Результатом фононной модуляции структуры была видимая трансформация крупно кристаллической фазы водорода в прозрачный криогенный слой при T = 4.2 К (гомогенизация структуры слоя).

Оставаясь в рамках той логики, которая была развита в Главе 2 в отношении структурной динамики криогенных слоев, мы должны констатировать, что формирование прозрачного топливного слоя не является достаточным признаком его качества, поскольку необходимо исследовать устойчивость полученной структуры при нагреве мишени. Поэтому была выполнена серия экспериментов с одной и той же мишенью, маркированной специальной меткой (см. Диаграмму 1, эксперимент №1, а также Рис. 3).



 $H_2([J=1]=75\%) \Rightarrow 2R = 620$ мкм $\Rightarrow P_f = 42$ атм

Рис. 3. Результирующие криогенные слои после применения метода ILT.

Сразу отметим, что в результате процесса гомогенизации (прежде всего, в зависимости от времени и частоты нагрузки) не всегда получались полностью прозрачные криогенные слои, т.е. либо образовывались структуры, представленные на Рис. За,б (большие времена перехода: $\Delta t \ge 30$ минут), либо процесс заканчивался так, как показано на Рис. Зв ($\Delta t < 10$ ми-

нут). Последующий нагрев структур, показанных на Рис. За,б, никогда не приводил к возврату исходной (см., например, Диаграмму 1, эксперимент №1, нулевой кадр), в то время как структура на Рис. Зв (прозрачный n-H₂ слой) иногда конвертировала в крупно кристаллическую фазу в интервале температур 4.2 К < $T < 0.5 T_{tp} (T_{tp} = 13.96 \text{ K} - тройная точка для n-H₂). Процесс имел резкий характер – время конверсии менее секунды – и всегда происходил при вполне определенной температуре из указанного диапазона.$

Какое же объяснение можно предложить в этом случае?

Наблюдавшаяся в некоторых случаях обратная конверсия при нагреве мишени, скорее всего, обусловлена тем, что фиксируемое лишь визуально образование прозрачного криогенного слоя не совпадает с истинным моментом окончания фазового перехода (см. § 2), и, следовательно, получаемая прозрачная структура должна выдерживаться при температуре перехода около получаса, на что указывают результаты по нагреву структур на Рис. 3а,б.

Следующий важный шаг – понять, в какой мере процесс гомогенизации структуры слоя захватывает поверхность слоя, т.е. может ли ILT работать как технология сглаживания шероховатости свободной поверхности топлива? Действительно, ILT является одним из перспективных кандидатов, так как воздействует именно на кристаллические ячейки и границы зерен (см. Диаграмму 1). Мы провели дополнительную серию экспериментов с криогенными слоями различной толщины: Рис. 4, W = 12.5 мкм \rightarrow время гомогенизации $\Delta t_h = 440$ сек; Рис. 5, W < 1 мкм \rightarrow время гомогенизации $\Delta t_h = 420$ сек.

Полученные результаты свидетельствуют о том, что процесс гомогенизации структуры слоя (метод ILT) имеет объемный характер, что обеспечивает возможность перехода к топливным слоям значительной толщины (важно для реакторных мишеней). Но, кроме того, ILT безусловно захватывает и поверхность слоя, что позволяет сглаживать его шероховатость. Напомним, что требования на качество слоя формулируются довольно жестко: локальные неоднородности (или шероховатость слоя) не должны превышать 1мкм [1]. Согласно результатам, представленным на Рис. 5, метод ILT работает с локальными неоднородностями еще меньшего размера, т.е. менее 1 мкм, так как толщина самого криогенного слоя W < 1 мкм. При этом легко показать, что процесс инициируется именно в области непрозрачности слоя, поскольку нагрев мишени сразу после окончания гомогенизации возвращает крупно кристаллическую структуру исходного нулевого кадра (см. Рис. 5, время 0 сек).

Еще одна серия экспериментов была посвящена изучению влияния исходной ортопара композиции водорода на скорость процесса гомогенизации. В этих экспериментах мы использовали водород с [J = 1] ~ 50 %, и получили следующие результаты:

1) время гомогенизации Δt_h сильно зависит от исходного орто-пара состава, увеличиваясь при снижении [J = 1]- концентрации (см. Рис. 6);

2) существует верхний порог по температуре, равный 4.2 К, выше которого процесс гомогенизации слоя прекращается (см. Рис. 7).

Таким образом, в экспериментах обнаружена корреляция между временем гомогенизации с одной стороны и орто-пара композицией и температурой перехода, с другой. Это имеет первостепенное значение для анализа возможных механизмов, объясняющих наблюдаемый эффект.



Рис. 4. Метод фононной модуляции структуры (ILT) делает непрозрачные слои прозрачными.



Puc. 5. Метод фононной модуляции структуры (ILT) может работать как технология сглаживания внутренней поверхности криогенного слоя.


Рис. 6. Чем меньше J = 1 концентрация, тем больше время гомогенизации.



Рис. 7. Нагрев мишени выше 4.2 К останавливает процесс гомогенизации.

§ 2. Обсуждение полученных результатов

В данном разделе будут обсуждаться возможные механизмы, объясняющие гомогенизацию поликристаллической структуры нормального водорода. Это позволит планировать новые серии экспериментов, имеющих целью расширение области применения низкотемпературной гомогенизации твердой структуры водорода на его изотопы и смеси, что может стать основой технологии массового производства качественных криогенных мишеней.

2.1. Эффекты самоорганизации в неравновесных системах

Топливное вещество внутри мишени находится в микро количествах, и его свойства могут существенно отличаться от свойств массивного образца. Так, например, эффекты самоорганизации хорошо известны для сверхтяжелой воды (модифицированная вода II с плотностью $\rho = 1.4 \text{ г/ см}^3$), полученной в узких кварцевых капиллярах ($\emptyset < 100 \text{ мкм}$) с образованием несвойственной обычной воде кольцевой структуры [12]. Кроме того, различие в энергиях структур водорода, соответствующих гексагональной плотной упаковке \rightarrow г.п.у. (hexagonal close packing, или hcp) и гранецентрированной кубической г.ц.к. \rightarrow (face-centered cubic, или fcc) экспоненциально мало в силу обнаруженного значительного гистерезиса при переходе из одной структуры в другую [13], что, кстати, и свидетельствует о фазовом превращении первого рода. Это означает, что довольно легко образуются неравновесные системы, например, с помощью ударной нагрузки (ILT). Существование обоих структур при T = 4.2 К наблюдалось в ряде работ, представленных с справочнике [13].

Таким образом, есть некоторые основания полагать, что эффекты самоорганизации на основе квантовых могут играть определенную роль [14] в обсуждаемом явлении низкотемпературной гомогенизации твердого n-H₂, и, как следствие, привести к формированию морфологически новой модификации водорода.

Поскольку прямых измерений структуры не проводилось, мы назвали полученную гомогенную фазу *α* - *структурой*, что является не только терминологически удобным для последующего анализа ее устойчивости при нагреве мишени, но может иметь реальный физический смысл, если высказанные нами предположения окажутся верными.

С другой стороны, учитывая уникальные свойства изотопов водорода, нельзя исключить возможности и других объяснений наблюдаемого эффекта. Некоторые из них будут представлены в следующем разделе.

2.1. Низкотемпературные фазовые переходы, обусловленные ориентационным упорядочением ядерных спинов

Наблюдаемое явление можно отнести к структурно-чувствительным свойствам молекулярных кристаллов. Твердый водород (H_2) и дейтерий (D_2) представляют интерес еще и потому, что в них проявляются значительные квантовые свойства и влияние спина ядер на поведение вещества. Так, например, в одной из первых работ, в которой исследовалось ориентационное упорядочение молекул на структуру и свойства дислокаций [15], показано, что при Т <7 К механические свойства n-H₂ (75% молекул ортоводорода и 25% молекул параводорода) и p-H₂ заметно различаются.

Известно [16,17], что с понижением температуры в водороде и дейтерии при больших концентрациях спиновых модификаций с J = 1 (например, ортоводород) возрастает роль квадрупольных взаимодействий, и происходят существенные изменения как в характере вращательного движения молекул, так и в кристаллической структуре. Ортомолекулы в кристаллической решетке последовательно испытывают заторможенное вращение, затем осцилляции, и, наконец, ориентационное упорядочение, которое сопровождается фазовым переходом. Аналогичные явления происходят и в нормальном водороде (n-H₂) в диапазоне температур $1.2 \div 4.2$ К. Отметим, что в параводороде (p-H₂) вплоть до температуры 1 К не наблюдается ни ориентационное упорядочение, ни фазовый переход [16,17].

Указанные особенности поведения обусловлены тем, что водород ($T_b = 20.39$ K) и дейтерий ($T_b = 23.66$ K) относятся к веществам с низкой точкой кипения (температура T_b), т.е., по сути дела, к квантовым кристаллам, в которых смещение атомов из положения равновесия, вызванное нулевыми колебаниями, составляет значительную часть расстояния между ближайшими соседями. Поведение квантовых кристаллов под действием нагрузки имеет качественно иной характер. Отмечено [16,17], что механическое воздействие, приводящее к деформации образца, стимулирует появление низкотемпературной г.ц.к.- фазы.

Таким образом, если наши предположения о характере наблюдаемого явления верны, тогда в основе его лежит фазовый переход между г.п.у.- и г.ц.к.- структурами, который и обнаруживает столь яркое различие в свойствах ориентационно- упорядоченной и неупорядоченной фаз. Следует отметить, что когда одно и тоже вещество может иметь несколько кристаллических модификаций, то переход из одной в другую может сильно влиять на его свойства. Достаточно упомянуть полиморфные превращения "белое" олово — "серое" олово (порошок), графит — алмаз и т.п. Поэтому указанный фазовый переход вполне может служить основанием для наблюдаемой гомогенизации n-H₂.

Сделаем несколько замечаний относительно тепловой устойчивости, т.е. отсутствия рекристаллизации получаемых модификаций нормального водорода при нагреве мишени. В §1 уже отмечалось, что в некоторых экспериментах наблюдалась обратная конверсия прозрачного n-H₂ слоя в крупно кристаллическую структуру при нагреве мишени в диапазоне температур 4.2 К < $T < 0.5 T_{tp}$. При этом, однако, сам факт обратной конверсии не вызывает удивления, так как происходит естественный возврат к высокотемпературной г.п.у.- структуре. А вот результат стабильного существования гомогенной α - структуры во всем диапазоне температур, т.е. вплоть до момента ее плавления, действительно требует объяснения, или хотя бы попытки такового.

Отметим, что упорядоченные фазы водорода и дейтерия имеют пространственную группу симметрии **Pa3** [16]. Это означает, что г.ц.к.- решетка состоит из четырех физически эквивалентных подрешеток, в каждой из которых все молекулы ориентированы вдоль одной из диагоналей куба. Следует также подчеркнуть, что фазовый переход осуществляется только после процесса упорядочения, и таким образом, новая решетка как бы "подстраивается" под заранее выделенное направление. Напомним, что каким бы способом ни выращивался моно-

кристалл, физической основой процесса является задание единственного направления роста и подавление всех других. Иными словами, еще до "начала" собственно фазового перехода, естественно возникающая ориентация служит той доминантой, которая способна повлиять на уровень дисперсности формируемой α - структуры твердого слоя водорода.

Однако мы должны учесть, что явления упорядочения могут приводить к аномально высоким значениям теплоемкости, т.е. к появлению так называемых λ - точек [18]. Наличие λ - аномалии в теплоемкости водорода с содержанием ортомодификации 66 % и 74 % зарегистрировано в серии работ [13]. Таким образом, хотя факт образования монокристаллического слоя в результате перехода г.п.у. \rightarrow г.ц.к. структур не доказан прямыми измерениями, тем не менее, результаты проведенных исследований и анализ литературы делают его очень вероятным.

Примечание. В работах [3,4] обнаружено, что анизотропия скорости звука присуща именно г.п.у. (hcp) - фазам изотопов водорода, и для H₂ и D₂ составляет около 20% (продольный звук) и 33% (поперечный звук). Поскольку в соответствии с теорией Дебая, решеточная теплопроводность прямо пропорциональна величине скорости звука, то это является причиной сферически ассиметричной сублимации топливного вещества, что приводит к росту шероховатости слоя и его разнотолщинности при доставке первоначально идеальной мишени в фокус лазерной установки [5,19-24]. Поэтому важно подчеркнуть, что в результате гомогенизации слоя мы конвертируем анизотропную гексоганальную г.п.у.- структуру в изотропную кубическую г.ц.к.- структуру, т.е. снимаем запрет на использование монокристаллического слоя в экспериментах по ИТС.

В заключение сделаем несколько важных замечаний, касающихся перспективы дальнейшего развития исследований по гомогенизации твердой структуры водородного топлива. Начнем с того, что каждой кристаллической модификации отвечает вполне определенная область на равновесной фазовой диаграмме. Однако именно для кристаллов способность существовать не в свойственной данной структуре границах является практически правилом. Яркий пример – алмаз и графит, красная и желтая сера и др., что объясняется трудностью преобразования одного порядка в другой в условиях крайней тесноты. Кроме того, электронографическими методами [13] установлено наличие г.ц.к.- решетки в микро количествах водорода и дейтерия (т.е. в мишени), при тех температурах и орто-пара композиции, при которых массивные образцы обладают г.п.у.- решеткой. Это означает, что можно не только получить низкотемпературную фазу, но и стабилизировать ее свойства во всем диапазоне существования твердого криогенного слоя.

§ 3. Резюме: направление дальнейших исследований

Полученные экспериментальные результаты свидетельствуют о возможности получения изотопов водорода с большим многообразием структурных типов, чем это отражено на соответствующих фазовых диаграммах. Основной вывод, который можно сделать на данном этапе исследований, заключается в том, что существует принципиальная возможность формирования криогенных слоев с заданной структурой топлива для обеспечения требуемой устойчивости слоя применительно к задачам ИТС. Для практической реализации этой перспективы необходимо провести детальные исследования времени отклика исходной структуры слоя на внешнее воздействие (т.е. времени гомогенизации Δt_h), а также изучить возможность стабилизации получаемой новой структуры. Прежде всего, необходимо учесть влияние следующих факторов:

■ Зависимость величины Δt_h от вещества криогенного слоя {p-D₂, n-T₂, DT- смесь; добавки Ne (обладает значительными квантовыми свойствами) или Ag}, а также материала оболочки;

■ Зависимость величины Δt_h от температуры, или ее модуляции (эффективность процесса растет с ее понижением);

■ Зависимость от характера и длительности нагрузки (планируется изучить не только механическое воздействие, но и применение ориентирующего, а возможно и поляризующего магнитного поля).

Полученные результаты позволят сделать окончательный вывод о природе наблюдаемого явления, а также определить, какой вид воздействия является прямым (кроме температуры), а какой опосредованным, т.е. с достоверностью указать наиболее оптимальный стимулирующий фактор.

Литература

- 1. S.O. Kucheev, A.V. Hamza. "Condensed Hydrogen for Thermonuclear Fusion. Ch.IV.Solid Layering (sec.B,1), J.Appl.Phys. **108**, 091101, 2010
- 2. E.M.Bringa, A.Caro, M.Victoria et al. *Atomistic modeling of wave propagation in nanocristals.* J. Minerals, Metals and Materials Soc., **57**, 67, 2005
- 3. R. Wanner, H. Meyer. Sound velocity in solid hydrogen and deuterium. Phys. Lett., **41A**, 189, 1972
- 4. R. Wanner, H. Meyer. *Velocity of sound in solid hexagonal close-packed H2 and D2*. J. Low Temp. Phys., **11**, 715, 1973
- 5. I.V.Aleksandrova, E.R.Koresheva, I.E.Ospov, et al. Ultra-fine fuel layers for application to *ICF/IFE targets*. Fusion Sci.Technol. **63**, 106, 2013
- 6. M.A. Meyers, A. Mishra, D.J. Benson. *Mechanical properties of nanocrystalline materials*. Progress in Materials Science, **51**, 427, 2006
- 7. I.V.Aleksandrova, E.R.Koresheva, I.E.Osipov. *ICF Cryotargets: Science and Technology*. Journal of Moscow Physics Soc., **4**, N2, 81, 1994
- 8. I.V.Aleksandrova, E.R.Koresheva, I.E.Osipov, L.V.Panina. *Cryotargets for Modern ICF Experiments*. Laser and Particle Beams **6**, N2, 539, 1996
- 9. I.V.Aleksandrova, E.R.Koresheva, O.N.Krokhin, I.E.Osipov. Rapid Low-Temperature Techniques for Solid Cryolayer Formation. J. Moscow Physics Soc. 7, 213, 1997
- I.V.Aleksandrova, E.R.Koresheva, O.N.Krokhin, I.E.Osipov. Statistical Investigations of Cryogenic Target Formation and Future Trends of Development. J. Moscow Physics Soc. 9, 311, 1999

- 11. I.V.Aleksandrova, E.R.Koresheva, I.E.Osipov. *Free-Standing Targets for Applications to ICF*. Laser and Particle Beams **17**, N4, 713, 1999
- 12. Б.В. Дерягин и Н.В. Чураев. Новые свойства жидкостей. М.: Наука, 1971
- 13. Б.И.Веркин, В.Г.Манжелий, В.Н.Григорьев и др. Свойства конденсированных фаз водорода и кислорода. Справочник. Киев: «Наукова Думка», 1984
- 14. G. Nicolis and I. Prigogine. Self-organization in non-equilibrium systems. New York, 1977
- 15. Д.Н.Большуткин, Ю.И.Стеценко, Л.И.Индан. Труды ФТИАНУ, 10, 86, 1970
- H.M.Roder, G.E.Childs, R.D.McCarty, P.E. Angerhofer. Survey of the properties of the hydrogen isotopes below their critical temperatures. NBS Techn. Note N641 (US Dept. of Commerce Publ., Boulder, Colorado, 1973)
- 17. P.C.Souers. *Hydrogen properties for fusion energy*. Lawrence Livermore National Laboratory, University of California Press (Berkley, Los Angeles, London, 1986)
- 18. Л.Д. Ландау. Сборник трудов. М.: Наука, 1, 123 стр., 1969
- 19. И.В.Александрова, Е.Р.Корешева, Е.Л.Кошелев, и др. К решению проблемы сохранения параметров криогенной мишени в процессе ее доставки в зону термоядерного горения. Вопросы Атомной Науки и Техники, сер. Термоядерный синтез **3**, 27, 2007
- 20. I.Aleksandrova, A.Belolipetskiy, E.Koresheva, et al. *Thermal and mechanical responses of cryogenic targets with a different fuel layer anisotropy during delivery process.* J.Russian Laser Research **29**, N5, 419, 2008
- 21. I.V.Aleksandrova, A.A.Belolipetskiy, E.R.Koresheva and S.M.Tolokonnikov. Survivability of fuel layers with a different structure under conditions of the environmental effects: Physical concept and modeling results. Laser and Particle Beams 26, N4, 643, 2008
- 22. I.V.Aleksandrova, E.R.Koresheva, E.L.Koshelev, et al. *Multi-criteria optimization for the delivery process of IFE targets with a different fuel structure*. Proceed. 2nd IAEA RCM on Coordinated Research Project "Pathways to Energy from Inertial Fusion - An Integrated Approach" (Prague, Czech Republic, May 19-23, 2008)
- 23. Е.Р.Корешева, И.В.Александрова. Обзор результатов, полученных ФИАН в области высокочастотного формирования и доставки криогенных топливных мишеней. XXXVII Международная (Звенигородская) конференция по физике плазмы и УТС (Моск. обл., Звенигород, 8 – 12 февраля, 2010)
- 24. I.V.Aleksandrova, A.A.Belolipetskiy, E.R.Koresheva et al. Insight into the Relation between the Fuel Microstructure and IFE Targets Response under Their Fabrication, Injection and Transport through the Reaction chamber. Proceed. the 1st Conference on Laser Inertial Fusion Energy (CLIFE, Yokohama, Japan, April 26 - 27, 2012)

Приложение 6

Геометрия канала формирования для мишеней класса HiPER

Для мишеней любого класса важнейшим направлением исследований является деятельность по оптимизации условий работы модуля формирования (МФ), включая упрощение конструкции и внесение поправок в спецификации. В данном приложении мы рассмотрим вопрос, касающийся геометрии канала формирования (угол захода спирали, общая длина спирали, ее шаг и диаметр).

§ 1. Уравнения движения мишени

Рассмотрим спиральный канал формирования радиуса R_0 (Рис. 1а). В каждой точке спирали касательная имеет постоянный наклон к горизонтальной плоскости под углом α .



Рис. 1. Движение мишени по спиральному каналу формирования (а). Справа схематически показано возникновение сопротивления качению мишени (б).

Пусть сферическая мишень радиуса r_0 и массы *m* движется по такому каналу со скоростью *V*. При этом возникает сопротивление движению в виде трения качения. Пара (T, F_f) стремится привести мишень в движение; пара (P_t, F_r) препятствует движению (см. Рис. 1б). Момент пары (P_t, F_r) называется моментом сопротивления качению. Причина появления трения качения заключается в следующем. Под действием силы тяжести оболочка, находящаяся на поверхности стенки канала формирования, деформируется. Вследствие этого она опирается не на одну точку (как в случае абсолютно твердых тел), а на площадку больших или меньших размеров (так называемое пятно контакта, область ас на Рис. 1б). Это приводит к тому, что точка приложения сил реакции опоры будет находиться в некоторой точке этой

площадки (точка є на Рис. 1б). Другими словами, когда оболочка начинает катиться, точка є смещается немного вперед от вертикали, проходящей через центр тяжести тела.

Таким образом, реакция стенки канала формирования на оболочку с топливом состоит из нормальной реакции опоры F_r (данная сила будет направлена вдоль координатной оси Y), касательной реакции опоры F_f (сила трения качения – направлена вдоль координатной оси X), и из пары трения качения (P_t, F_r) с моментом сопротивления качению. Величина сопротивления качению определяется деформацией мишени, деформацией поверхности канала формирования, или того и другого. Дополнительными факторами являются радиус мишени, скорость движения, поверхностная адгезия, относительное микроскольжение (проскальзывание) поверхностей контакта.

Движение мишени можно подразделить на три фазы:

- Трения нет, нет и вращения мишени (sliding and only sliding, или S&S-мода);
- Трение есть, мишень катится с проскальзыванием (rolling and sliding, или R&S-мода);
- Трение есть, мишень катится без проскальзывания (rolling and only rolling, или R&R-мода).

Пусть мишень движется вдоль канала со скоростью V(t). Уравнение движения такой мишени имеет вид

$$\frac{dV}{dt} = g\sin\alpha - F_f / m \,. \tag{1}$$

Условие качения мишени без скольжения

$$F_f \le F_{\max} , \qquad (2)$$

где $F_{\max} = k_s N$. Коэффициент трения скольжения k_s считается заданным, сила реакции стенки канала N будет определена ниже.

Если J, ω момент инерции мишени и угловая скорость ее вращения, то силы (F_f, F_r) вращают мишень согласно уравнению моментов

$$J\frac{d\omega}{dt} = r_0 F_f - \delta_r N, \qquad (3)$$

где δ_r – коэффициент трения качения, который имеет размерность длины и зависит от материалов мишени и стенки канала, а также физического состояния их поверхностей: чем поверхности тверже и чем выше класс чистоты обработки (например, поверхности шлифованы), тем он будет меньше.

Строго говоря, коэффициент трения качения должен зависеть еще от радиусов кривизны поверхностей в точке соприкосновения и от удельной нагрузки, приходящейся на единицу поверхности соприкосновения. Поэтому на практике коэффициент трения качения

определяется экспериментально. Он изменяется в весьма широких пределах от 0,0005 см до величины, превышающей 1 см (например, в высших кинематических парах).

Это означает, что при проектировании МФ для мишеней любого класса совершенно необходимо проведение цикла исследований по измерению величины коэффициента трения качения при вариации параметров канала формирования (КФ). Эти исследования для мишеней класса HiPER были проведены при использовании набора специально изготовленных макетов КФ [1-4]. Используемые макеты были выполнены из медных трубок различного диаметра, варьировались также такие параметры КФ как угол наклона спирали, число витков, диаметр спирали, а также уровень разрежения внутри КФ.

Перейдем теперь к математическому описанию процесса движения мишени в канале формирования. Вообще говоря,

$$V \ge \omega r_0. \tag{4}$$

Если мишень катится с *проскальзыванием*, то неравенство (4) строгое. Везде ниже такое движение будем называть качением с проскальзыванием (R&S-мода). Если же мишень катится *без проскальзывания* (R&R-мода), то $V = \omega r_0$, и уравнение (3) примет вид

$$F_f = \frac{J}{r_0^2} \frac{dV}{dt} + k_r N , \qquad (5)$$

где $k_r = \delta_r / r_0$ - *безразмерный* коэффициент трения качения. Подставляя выражение для силы F_f из (5) в (1), получим уравнение качения

$$(1+\zeta)\frac{dV}{dt} = g\sin\alpha - \frac{k_r N}{m}.$$
(6)

Безразмерный коэффициент определяется как $\zeta = \frac{J}{mr_0^2}$. Сила реакции стенки канала N равна

$$N = m\cos\alpha \sqrt{g^2 + \frac{V^4\cos^2\alpha}{R_0^2}} \,. \tag{7}$$

Второе слагаемое под корнем – это квадрат центростремительной силы. При качении сила трения F_f определяется выражением (5), и в силу (2) справедливо выражение (8).

Условие качения (R&R-мода):

$$\zeta \frac{dV}{dt} \le \frac{(k_s - k_r)N}{m}.$$
(8)

Подставим в (8) выражение для величины dV/dt из (6). После простых преобразований будем иметь

$$\zeta g \sin \alpha \leq \left[(1+\zeta)k_s - k_r \right] N / m.$$

Используя (7), разрешим последнее неравенство относительно скорости V. Получим новую запись условия качения

$$V \ge V_{ra},\tag{9}$$

где

$$V_{ra} = \frac{\sqrt[4]{(\eta^2 t g^2 \alpha - 1) R_0^2 g^2 \cos^2 \alpha}}{\cos \alpha}, \quad \eta = \frac{\zeta}{(1 + \zeta) k_s - k_r}.$$
 (10)

Величина V_{ra} - значение скорости, при которой мишень переходит из режима скольжения (R&S – мода) в режим качения с ускорением (*R&R-мода*).

Таким образом, если скорость движения мишени меньше критического значения V_{ra} , то мишень скользит по стенке канала, т.к. нарушено условие (2) для силы F_f , определяемой выражением (5). В этом случае ее движение описывается дифференциальным уравнением

$$\frac{dV}{dt} = g\sin\alpha - F_{\max} / m.$$
(11)

Конечно, по умолчанию для вычисления V_{ra} предполагается, что подкоренное выражение в (10) неотрицательно, т.е.

$$\frac{(1+\zeta)k_s - k_r}{\zeta} \le tg\alpha \,. \tag{12}$$

С того момента, когда выполняется неравенство (9), движение мишени переходит из режима скольжения в *режим качения с ускорением* и подчиняется закону (6). Это продолжается до тех пор, пока правая часть дифференциального уравнения (6) положительна. После того, как она обращается в ноль, мишень *катится с постоянной скоростью* (13), выражение для которой получается из условия равенства нулю правой части (6).

$$V \equiv V_r = \frac{\sqrt[4]{(tg^2\alpha / k_r^2 - 1)R_0^2 g^2 \cos^2 \alpha}}{\cos \alpha}.$$
 (13)

§ 2. О моментах инерции мишени

В приведенных выше уравнениях присутствует коэффициент $\zeta = \frac{J}{mr_0^2}$. Для его

вычисления понадобятся формулы для моментов инерции шара и оболочек.

Момент инерции шара радиуса *р* и массы *M*, относительно оси, проходящей через центр, равен

$$J_b = 2 / 5M \rho^2$$

• Момент инерции шарового слоя радиусов $\rho_1 < \rho$ и массы M относительно оси, проходящей через центр, равен

$$J_{s} = \frac{2}{5}M\rho^{2}\frac{1-\Delta^{5}}{1-\Delta^{3}},$$
 где $\Delta = \rho_{1} / \rho$.

Если $\Delta = 0$, то $J_s = J_b$. Если $\Delta \to 1$, то $J_s \to \frac{2}{3}M\rho^2$. Последнее выражение равно моменту инерции сферы массы *M* и радиуса ρ .

Пусть слои двухслойной мишени, заполненной газом массы m_{σ} , имеют размеры

 $r_2 < r_1 < r_0$ и $\Delta_1 = \frac{r_1}{r_0}, \Delta_2 = \frac{r_2}{r_1}$, и массы внешнего и внутреннего слоя равны m_1, m_2 . Обозначим массу мишени $m = m_g + m_1 + m_2$, и отношения $\mu_1 = m_1 / m$, $\mu_2 = m_2 / m$. Очевидно, что $m_g = m(1 - \mu_1 - \mu_2)$. Тогда момент инерции мишени в зависимости от характера от ее движения будет определяться следующими соотношениями.

▶ Двухслойная мишень. Если газ вращается как целое вместе с мишенью, то

$$J_{\max} = J_b + J_{s1} + J_{s2},$$

или

$$J_{\max} = 2/5mr_2^2(1-\mu_1-\mu_2) + \frac{2}{5}m\mu_1r_0^2\frac{1-\Delta_1^5}{1-\Delta_1^3} + \frac{2}{5}m\mu_2r_1^2\frac{1-\Delta_2^5}{1-\Delta_2^3}.$$

▶ Двухслойная мишень. Если газ не вращается вместе с мишенью, то

$$J_{\min} = J_{s1} + J_{s2},$$

или

$$J_{\min} = \frac{2}{5} m \mu_1 r_0^2 \frac{1 - \Delta_1^5}{1 - \Delta_1^3} + \frac{2}{5} m \mu_2 r_1^2 \frac{1 - \Delta_2^5}{1 - \Delta_2^3}.$$

Теперь нетрудно выписать значение $\zeta = \frac{J}{mr_0^2}$.

1)
$$\zeta_{\text{max}} = 2/5(1-\mu_1-\mu_2)(\Delta_1\Delta_2)^2 + \frac{2}{5}\mu_1\frac{1-\Delta_1^5}{1-\Delta_1^3} + \frac{2}{5}\mu_2\Delta_1^2\frac{1-\Delta_2^5}{1-\Delta_2^3}.$$

2)
$$\zeta_{\min} = \frac{2}{5} \mu_1 \frac{1 - \Delta_1^5}{1 - \Delta_1^3} + \frac{2}{5} \mu_2 \Delta_1^2 \frac{1 - \Delta_2^5}{1 - \Delta_2^3}$$

Справедливо двойное неравенство

$$\frac{2}{5} \leq \zeta < \frac{2}{3}.$$

Левое неравенство станет равенством, если вся масса мишени равномерно распределена по ее объему. Правое неравенство отвечает тому случаю, когда масса мишени сосредоточена в ее оболочке.

§ 3. Основные выводы

Выпишем сначала условие для оптимизации движения мишени в канале формирования: этап скольжения мишени должен быть исключен, чтобы сохранить качество внешней оболочки мишени и обеспечить требуемый уровень симметризации слоя.

Рассмотрим различные варианты. Начнем с условия $V_{ra} > 0$. Пусть начальная скорость движения мишени равна V_i , а длина канала $L = H / \sin \alpha$. Предположим, что $k_r < k_s < tg\alpha$. Нетрудно показать, что в этом случае

$$V_{r} = \frac{\sqrt[4]{(tg^{2}\alpha / k_{r}^{2} - 1)R_{0}^{2}g^{2}\cos^{2}\alpha}}{\cos\alpha} > V_{ra} = \frac{\sqrt[4]{(\eta^{2}tg^{2}\alpha - 1)R_{0}^{2}g^{2}\cos^{2}\alpha}}{\cos\alpha} > 0.$$

Последнее неравенство справедливо, если $\eta tg \alpha > 1$. В противном случае $V_{ra} = 0$.

Пусть $\eta tg \alpha > 1$ и

$$V_{i} < V_{ra} = \frac{\sqrt[4]{(\eta^{2} t g^{2} \alpha - 1) R_{0}^{2} g^{2} \cos^{2} \alpha}}{\cos \alpha}.$$
 (1a)

■ Тогда движение начинается со скольжения. Время скольжения *t*_s получим, интегрируя (11).

$$t_{s} = \int_{V_{i}}^{V_{ra}} \frac{dV}{g \sin \alpha - k_{s} \sqrt{g^{2} \cos^{2} \alpha + V^{4} \cos^{4} \alpha / R_{0}^{2}}}$$
(2a)

Отрезок пути скольжения

$$l_s = \int_{V_i}^{V_{ra}} \frac{VdV}{g\sin\alpha - k_s\sqrt{g^2\cos^2\alpha + V^4\cos^4\alpha/R_0^2}}$$

Здесь

$$V_{ra} = \frac{\sqrt[4]{(\eta^2 t g^2 \alpha - 1) R_0^2 g^2 \cos^2 \alpha}}{\cos \alpha}, \quad \eta = \frac{\zeta}{(1 + \zeta) k_s - k_r}.$$

Если окажется, что отрезок скольжения больше длины канала, т.е. $l_s \ge L$, то вместо формулы (2a) следует искать время скольжения

$$t_{s} = \int_{V_{i}}^{V_{1}} \frac{dV}{g \sin \alpha - k_{s} \sqrt{g^{2} \cos^{2} \alpha + V^{4} \cos^{4} \alpha / R_{0}^{2}}},$$

где верхний предел интегрирования V₁ есть корень нелинейного уравнения:

$$L = \int_{V_i}^{V_1} \frac{V dV}{g \sin \alpha - k_s \sqrt{g^2 \cos^2 \alpha + V^4 \cos^4 \alpha / R_0^2}}$$

Последнее просто означает, что весь путь пройден в режиме скольжения. В этом случае

$$t_f = t_s$$
.

■ Если же $l_s < L$, то после того как скорость станет равной V_{ra} , начнется качение с ускорением, которое описывается дифференциальным уравнением

$$(1+\zeta)\frac{dV}{dt} = g\sin\alpha - \frac{k_r N}{m}.$$
(3a)

Время качения t_{ra} получим, интегрируя это уравнение. Оно равно

$$t_{ra} = (1+\zeta) \int_{V_{ra}}^{V_2} \frac{dV}{g \sin \alpha - k_r \sqrt{g^2 \cos^2 \alpha + V^4 \cos^4 \alpha / R_0^2}},$$

а отрезок пути качения с ускорением равен $L - l_s$. Причем значение скорости V_2 , при которой мишень заканчивает движение, получим, решив уравнение

$$L - l_{s} = (1 + \zeta) \int_{V_{ra}}^{V_{2}} \frac{V dV}{g \sin \alpha - k_{r} \sqrt{g^{2} \cos^{2} \alpha + V^{4} \cos^{4} \alpha / R_{0}^{2}}}$$

Предельное значение скорости недостижимо, т.к. ускорение в правой части (3а) стремится к нулю.

$$V_r^{\max} = \frac{\sqrt[4]{(tg^2 \alpha / k_r^2 - 1)R_0^2 g^2 \cos^2 \alpha}}{\cos \alpha}$$

Общее время движения теперь равно

$$t_f = t_s + t_{ra}.$$

Таким образом, рассмотренные варианты не принесли желаемого результата. Нам не удалось реализовать основное условие оптимизации $t_s = 0$ при $V_i < V_{ra} > 0$.

Теперь рассмотрим иные возможности. Обратим внимание на то, что при качении тела по наклонной плоскости существует предельное значение угла наклона, свыше которого качение тела без скольжения становится не возможным. Предельный угол есть произведение момента инерции (какое тело скатывается) и коэффициента трения скольжения (взаимодействие пары материалов "движущееся тело – поверхность скатывания"). Это означает, что движение в режиме качения возможно, если угол наклонной плоскости не превосходит предельный угол. Поставим тот же вопрос для нашего случая: при каких параметрах канала формирования можно исключить скольжение мишени на всей длине спирального канала.



Рис. 2. Зависимость скорости движения мишени от времени.

В общем случае зависимость скорости движения мишени от времени изображена на Рис. 2. Здесь V_i – начальное значение скорости, V_{ra} – значение скорости, при которой мишень переходит из режима скольжения в режим качения с ускорением. При этом ускорение стремится к нулю, и с какого-то момента можно считать, что мишень катится с практически постоянной Таким образом, скоростью. мишень скользит на интервале времени $(0, t_s)$, и далее катится с уменьшающимся до нуля ускорением.

Выпишем характерные скорости процесса движения, которые соответствуют следующим величинам:

• (A)
$$V_r^{\text{max}} = \frac{\sqrt[4]{(tg^2\alpha/k_r^2 - 1)R_0^2g^2\cos^2\alpha}}{\cos\alpha}$$
, $\beta = k_r$ (установившаяся скорость при качении)

• (Б)
$$V_{ra} = \frac{\sqrt[4]{(tg^2\alpha/\beta^2 - 1)R_0^2g^2\cos^2\alpha}}{\cos\alpha}, \ 1/\eta = \beta = \frac{(1+\zeta)\cdot k_s - k_r}{\zeta}$$
 (V_{ra} - значение скорости,

при которой мишень переходит из режима качения в режим скольжения)

Из анализа Рис. 2 очевидно, что если скорость $V_{ra} = 0$, то движение мишени будет осуществляться только в режиме качения. Чтобы режим качения был осуществим даже для нулевой начальной скорости V_i , подкоренное выражения в (А) должно быть положительно. Воспользуемся сказанным, и выпишем в Таблице 2 ограничения по углу для реализации режима качения.

Таблица 2. Реализация режима качения в спиральном канале формирования.

Условие	Ограничения по углу	Формула
Начало качения	$tg\alpha > k_r$	(A)
Отсутствие режима	$(1+\zeta)k_s - k_r$	
скольжения	$lg\alpha <$	(Б)

Таким образом, для угла захода спирали α окончательно имеем следующий разрешенный диапазон для осуществления качения мишени без проскальзывания (рабочее поле углов):

$$arctg(k_r) = \alpha_{min} < \alpha < \alpha_{max} = arct\{(1+\zeta)k_s - k_r\}/\zeta$$
.

При условии $k_r = k_s$, справедливо равенство $\alpha_{\min} = \alpha = \alpha_{\max} = \alpha^0$. Другими словами, качение возможно лишь при единственном значении угла, называемым предельным углом качения α_r^0 .

§ 4. Практическая реализация полученных результатов

Прежде чем перейти к вопросу оптимизации геометрии канала формирования, подчеркнем, что условие на качение без проскальзывания определяется соотношением действующих сил и зависит от параметров задачи, которые эти силы определяют.

Сформулируем основные положения. Для оптимизации процесса формирования мишени по методу FST необходимо провести исследования по моделированию качения мишени по поверхности спирального канала при различных условиях. Важность данного направления обусловлена следующими факторами:

■ Чтобы оптимизировать процесс FST формирования, необходимо иметь данные по времени формирования для различных материалов мишени (важно различие по модулю

Юнга) и различных толщин оболочки. Кроме того, важны вариации начальной температуры мишени при входе ее в канал формирования T_{in} , так как именно эта величина напрямую определяет время динамической симметризации жидкого слоя при движении мишени в канале формирования. Резюме по результатам расчета времени формирования в зависимости от геометрии и прочности оболочки при различных значениях начальной температуры представлено на Рис. 3. При неизменном дизайне мишени ВТ-2 по толщине оболочки ($\Delta R = 3$ мкм), время ее формирования составит не более 25 сек при максимальном значении $T_{in} = 37$ К и максимальном значении модуля Юнга E = 15 ГПа. Далее мы покажем, что такие времена можно реализовать даже для каналов формирования в виде одиночной спирали.



Рис. 3. Время формирования мишени ВТ-2 при различных параметрах оболочки и условиях эксперимента.

■ Серьезной проблемой является выбор материалов и определение коэффициента трения качения.

Величина коэффициента трения качения зависит от многих факторов, причем не только от того, какие материалы контактируют, но и от того, насколько гладко обработаны контактирующие поверхности. Строго говоря, коэффициент трения качения должен зависеть еще от радиусов кривизны поверхностей в точке соприкосновения и от удельной нагрузки, приходящейся на единицу поверхности соприкосновения. Кроме того, данные о величине трения качения при низких температурах крайне ограничены.

■ При движении мишени в канале формирования должен быть реализован именно режим качения (без проскальзывания), чтобы добиться требуемой симметризации слоя, а также сохранить качество внешней оболочки мишени.

■ Результат оптимизации считается достигнутым, если выполнено соотношение времен → геометрия канала формирования должна быть такова, чтобы время качения мишени (время пребывания в канале формирования) было больше, нежели время формирования слоя.

При проведении расчетов варьировались следующие параметры FST эксперимента:

- толщина стенки оболочки и прочностные характеристики материала оболочки,

- коэффициенты трения скольжения и трения качения,

– геометрия канала формирования (Рис. 4: угол захода спирали (α), общая длина спирали (L), ее шаг (h), высота (H) и диаметр ($D = 2R_0$).



Рис. 4. Схематическое изображение спирального канала формирования.

В работах [1-4] проведено моделирование и осуществлена оптимизация спирального канала формирования для частотного производства по методу FST сферических криогенных мишеней класса HiPER (High Power laser Energy Research, $E_l \sim 200$ кДж, $v \ge 1$ Гц). Наиболее важные результаты расчетов и экспериментов приведены для базовой мишени класса HiPER с оболочкой типа BT-2 (см. Диаграммы 1 и 2).

Литература

- И.В.Александрова, Е.Р.Корешева, Е.Л.Кошелев, и др. FST- формирование криогенного топливного слоя в сферических лазерных мишенях типа HiPER с компактной и пористой полимерной оболочкой. XXXVII Международная (Звенигородская) конференция по физике плазмы и УТС (Моск. Обл., Звенигород, 8 – 12 февраля 2010)
- E.R.Koresheva, I.V.Aleksandrova, E.L.Koshelev, et al. *FST-formation of cryogenic layer inside spherical shells of HiPER-class: results of mathematical modeling and mock-ups testing.* 31st European Conference on Laser Interaction with Matter (ECLIM, Budapest, Hungary, 6-10 September, 2010)
- E.R.Koresheva, I.V.Aleksandrova, L.Koshelev, et al. Status of FST technologies for HiPER targets. Proceed. 3rd European Target Fabrication Workshop, 29 September-1 October, 2010, Oxford, United Kingdom
- 4. I.V.Aleksandrova, A.A.Belolipetskiy, E.R.Koresheva, et al. *FST- technologies for high rep-rate production of HiPER scale cryogenic targets*. Proceed. SPIE **8080**, 80802M, 2011

Диаграмма 1. Реализация качения мишени. Антифрикционные полимерные материалы.



Спиральный КФ (макет): α – угол захода спирали; D – диаметр спирали Результаты расчетов:

1) Серое поле $k_r = 0.01, k_s = 0.1$ Диапазон углов от 0.57^0 до 13.23^0

2) Полосатое поле $k_r = 0.09, k_s = 0.1$ Диапазон углов от 5.1⁰ до 6.5⁰

3) Черное поле $k_r = k_s = 0.1$ ДВИЖЕНИЕ начинается только с угла 5.7⁰. При этом:

• Качение без скольжения возможно только при угле 5.7⁰.

• Рабочее поле углов сворачивается в линию .

▶ Антифрикционные полимерные материалы (коэффициент трения скольжения):

П	олимер	Коэффициент трения	Полимер	Коэффициент трения		
1.	ПА	0,1-0,2	5. ПК	0,3		
2	ПТФЭ	0,1-0,15	6. ПП	0,3-0,4		
3	ПЭ	0,1-0,15	7. ЭС	0,15-0,25		
4.	ΠФ	0,15-0,2	8. ФФС	0,15-0,25		

<u>ОБОЗНАЧЕНИЯ</u>: политетрафторэтилен (ПТФЭ), полиамид (ПА), полиэтилен (ПЭ), поликарбонат (ПК), полиформальдегид (ПФ), полипропилен (ПП), эпоксидная смола (ЭС), фенол формалиновая смола (ФФС). Диаграмма 2. Оптимизация канала формирования для базовой мишени класса HiPER с оболочкой BT-2.

■ Коэффициент трения скольжения ks= 0.05, коэффициент трения качения kr – варьируется

kr	Время	Время	$ au_{\it res}$		
NI NI	скольжения	качения			
	(сек)	(сек)	(сек)		
0.010	0.000	4.622	4.622		
0.014	0.000	4.782	4.782		
0.018	0.000	4.950	4.950		
0.020	0.363	5.036	5.399		
0.024	1.270	5.222	6.492		
0.030	1.716	5.538	7.254		
0.040	2.450	6.227	8.678		
0.044	2.900	6.629	9.530		
0.046	3.235	6.901	10.136		
0.048	3.762	7.291	11.053		
0.050	5.202	8.216	13.418		

Результат: данном случае не удается B одновременно реализовать требуемое время пребывания спиральном канале мишени В формирования в режим качения мишени.

► ОПТИМИЗАЦИЯ ОТСУТСТВУЕТ

■ Коэффициент трения скольжения ks = 0.1, коэффициент трения качения kr – варьируется



формирования au_{res} (сек)

Результат: в данном случае максимальное время пребывания мишени в спиральном канале формирования в режиме качения составляет $\tau_{res}^{max} = 25$ секунд, что позволяет осуществлять широкий класс экспериментов с мишенями различного типа.

▶ОПТИМИЗАЦИЯ ДОСТИГНУТА

Приложение 7

Конструирование FST-модуля для поточного производства криогенных топливных мишеней класса HiPER

§ 1. Специализированный модуль FST- формирования

Модуль формирования (МФ) предназначен для решения следующих задач:

(a) Однократный режим формирования: демонстрация возможности формирования методом FST твердого D_2 слоя на внутренней поверхности полых сферических оболочек диаметром ~2 мм (базовые мишени класса HiPER для экспериментов по ударному сжатию), движущихся под действием гравитации внутри охлаждаемого трубчатого канала,

(б) Высокочастотный режим формирования: демонстрация возможности формирования криогенных мишеней класса HiPER с частотой от 1 Гц.

В настоящее время в дизайне мишеней класса HiPER для экспериментов по ударному сжатию рассматривается два типа мишеней, в том числе:

(1) Базовая Мишень-2 (ВТ-2) – однослойная сферическая оболочка из компактного полимера (внешний радиус $R_0 = 1044$ мкм, толщина стенки $\Delta R = 3$ мкм). Топливо: DT или D₂ (твердый слой толщиной W = 211 мкм).

(2) Базовая Мишень-2а (BT-2a) — двухслойная сферическая оболочка с внешним слоем из компактного полимера ($R_0 = 1020$ мкм, $\Delta R = 3$ мкм) и внутренним слоем из пористого полимера CH (DT)₆ = 70 мкм. Топливо: DT или D₂ (твердый слой W = 120 мкм).

Поскольку ФИАН не имеет разрешения на работу с радиоактивным тритием, проектируемый прототип МФ рассчитан для работы с оболочками, заполненными D₂ топливом (или другим нерадиоактивным изотопом водорода).

Для того, чтобы МФ мог быть впоследствии адаптирован, без существенных изменений в его конструкции, для работы с радиоактивным DT топливом, проектирование проведено с учетом выполнения следующего необходимого условия: <u>конструкция и принцип ее работы</u> удовлетворяют требованию по минимизации временных и пространственных масштабов каждой операции по производству криогенной мишени. Чтобы выполнить данное условие, в основу работы МФ положены следующие принципы, возможность реализации которых доказана экспериментально в предыдущих исследованиях ФИАН [1,2]:

- работа с незакрепленными мишенями на каждом этапе замкнутого производственного цикла «заполнение оболочек топливом – транспортировка из системы заполнения в МФ и между узлами МФ - формирование криогенного слоя – инжекция готовой мишени из канала формирования в тест камеру - диагностика готовой криогенной мишени»;

- использование специального мишенного контейнера (МК) для размещения массива оболочек на этапах их заполнения и транспортировки в МФ

- транспортировка мишеней между узлами МФ способом инжекции под действием только сил гравитации;

- формирование криогенного слоя внутри движущихся незакрепленных сферических оболочек методом FST. Поскольку МК содержит массив незакрепленных оболочек, это дает следующие преимущества по сравнению с общепринятым способом работы с мишенью на держателе:

- снижение объема паразитного газа минимум в 2.5 раза
- снижение времени заполнения (в расчете на 1 мишень).

Кроме того, использование незакрепленных оболочек – необходимое требование для перспективного использования прототипа МФ как элемента комплексной мишенной установки, обеспечивающей непрерывное формирование и частотную инжекцию криогенных мишеней в экспериментальную камеру лазерной установки HiPER.

Для демонстрации возможности формирования методом FST твердого D_2 слоя в мишенях класса HiPER (в однократном режиме) будет использована система характеризации (100проекционный видео-томограф), созданная и эксплуатируемая в ФИАН с 2004 г. [3,4]. Сборка прототипа МФ и томографа на оптическом столе показана на Рис. 1.

Для демонстрации работы прототипа МФ в частотном режиме предполагается осуществлять наблюдение за качеством мишеней в реальном времени. Возможные подходы к решению этой задачи: Фурье-голография и пороговая характеризация [4].



Рис.1. Схема взаимного размещения модуля формирования и системы характеризации на оптическом столе: 1 – модуль формирования, 2 – привод МК, 3 – рама крепления, 4 – система характеризации (томограф), 5 – оптический стол.

§ 2. Функциональная схема модуля FST-формирования крио мишеней класса HiPER

Функциональная схема модуля формирования (МФ) показана на Рис.2а. Перечень основных и промежуточных (интерфейсных) узлов МФ дан ниже:

► МК - Мишенный контейнер, который является промежуточным элементом между системой заполнения мишеней топливным газом и МФ.

▶ КР - Камера разгерметизации МК и подачи мишеней с топливом в канал формирования, которая также включает

- гнездо для размещения МК,

- узел сопряжения МК с приводом,

- ключ для разгерметизации МК,

- клапан затвора между КР и каналом формирования

- клапан затвора между КР и системой удаления паразитного топлива.

▶СУП - система удаления паразитного топлива

▶ КФ - Канал формирования криогенного слоя по методу FST

► ТК - Тестовая оптическая камера, содержащая также устройство позиционирования (УП) бесподвесных мишеней, манипулятор мишеней и 2 накопителя (А1- накопитель годных мишеней, А2 - накопитель негодных мишеней; см. Рис.2б)

▶СК - Система криостатирования

► САУ - Система автоматического контроля и управления работой МФ, включающая также привод МК, обеспечивающий подачу мишеней из МК в КФ либо в однократном режиме, либо с частотой от 0.1 Гц

▶ Вспомогательное оборудование:

- система вакуумирования, система заправки крио агентов,

- система сбора отработанного гелия,

- система электроснабжения.

Порядок работы МФ строго определен:

■ Транспортировка массива оболочек с топливом с помощью МК из системы заполнения в МФ (осуществляется при комнатной температуре).

■ Охлаждение и разгерметизация МК без разрушения оболочек (T~30 K); удаление паразитного топлива.

■ Подача мишеней из МК в канал формирования (КФ) под действием гравитации.

■ FST - формирование криогенного слоя топлива на внутренней поверхности оболочки при движении мишени в спиральном КФ с охлажденными стенками.

■ Инжекция готовой криогенной мишени в тест камеру (T~5-10 K).

■ Диагностика качества криогенного слоя внутри мишени. В зависимости от задач, осуществление либо прецизионной характеризации слоя (томография), либо быстрая характеризация с использованием пороговых алгоритмов.

■ В соответствии с результатами диагностики, подача мишени либо в накопитель негодных мишеней (A1), либо в накопитель мишеней хорошего качества (A2).





Обозначения: b1 - схема вращения, b2, b3 - общий вид макета с различным расположением мишени относительно центра вращающегося диска (1 – диск, 2 – кольцевой манипулятор, 3 – оболочка из полистирола Ø2 мм).

Рис.2. Функциональная схема модуля формирования, предназначенного для частотного формирования криогенных мишеней класса HiPER методом FST.

§ 3. Описание назначения и конструкции отдельных модулей экспериментального комплекса

Чертеж общего вида (Рис.3.1) прототипа МФ, предназначенного для производства криогенных мишеней типа HiPER с помощью метода FST, включает:

- мишенный контейнер (МК) с интерфейсом, включающим ключ и привод МК
- заливной оптический гелиевый криостат (ГК),
- сменную вставку в шахту криостата, включающую в свой состав также трубчатый канал формирования (КФ),
- оптическую тест камеру (ТК),
- раму крепления.

Кроме того, в состав МФ входит система автоматизации и контроля (САК).

202

3.1. Назначение отдельных модулей комплекса

<u>Мишенный контейнер с интерфейсом</u>

МК является смежным элементом между системой заполнения оболочек газообразным топливом и модулем формирования.

МК предназначен для размещения и транспортировки массива незакрепленных оболочек типа HiPER из системы заполнения в модуль формирования при 300 К. МК также используется для размещения массива оболочек с топливом в защитно-шлюзовом модуле (ЗШМ) и поочередной подачи оболочек с топливом из ЗШМ в канал формирования (КФ).

Интерфейс (включает ключ и привод МК), обеспечивает работу МК в автоматическом режиме.

МК может также использоваться для длительного хранения газонаполненных оболочек и/или их транспортировки на большие расстояния (например, в другие лаборатории) при комнатной температуре.

Заливной оптический гелиевый криостат

ГК обеспечивает поле температур на внутренних элементах модуля формирования (МФ), необходимое для реализации процедуры FST-формирования криогенных мишеней.

Сменная вставка в шахту криостата

Сменная вставка в шахту криостата обеспечивает формирование по методу FST криогенного слоя на внутренней поверхности движущейся незакрепленной сферической оболочки типа HiPER.

Оптическая тест камера

ТК предназначена для оптического наблюдения готовой криогенной мишени с целью осуществления либо (а) высокоточной диагностики криогенного слоя в режиме сканирования, либо (б) диагностики качества криогенного слоя в режиме *on-line*.

<u>Рама крепления</u>

Данный элемент выполняет следующие функции:

а) Крепление МФ на оптическом столе, что создает необходимую жесткость ТК при сканировании криогенной мишени

б) Крепление привода МК

<u>Система автоматизации и контроля</u>

САК предназначена для контроля и поддержания рабочих параметров FST- эксперимента, а также для управления работой исполнительных механизмов МФ в автоматическом режиме.

3.2. Описание выбранной конструкции модулей

<u>Мишенный контейнер</u>

Конструкция МК, предназначенная для работы с нерадиоактивными изотопами водорода, представлена на Рис.3.2.

Основой конструкции является корпус (поз.1) цилиндрической формы. В корпусе выполнена внутренняя резьба для ввинчивания вкладыша (поз.2). Нижний торец корпуса закрыт резьбовой пробкой (поз.6), в выемке которой размещается шарик (поз.7), на который опирается втулка (поз.5) с запорным элементом (поз.4) в виде конуса. На верхнем торце корпуса имеется бурт (поз.А), на средней части корпуса – шип (поз.В). Бурт и шип обеспечивают фиксацию МК как в камере заполнения, так и в защитно-шлюзовом модуле МФ. В стенке корпуса на уровне запорного элемента выполнены продолговатые отверстия для выхода мишеней. Вкладыш служит для размещения сепаратора (поз.3) с находящимися в его ячейках мишенями. Снаружи вкладыша имеется ходовая резьба, обеспечивающая при его вращении осевое перемещение внутри корпуса. Внутренний канал вкладыша в нижней части переходит в коническую расточку, с которой контактирует запорный элемент (поз.4). Верхний торец вкладыша оформлен в виде головки под ключ для передачи вращения от внешнего привода. Сепаратор (поз.3) представляет собой стержень с наклонными цилиндрическими ячейками, в которых размещаются мишени, и выполняет также функцию дозатора подачи мишеней в канал формирования.

При вращении вкладыша против часовой стрелки он выдвигается из корпуса, сепаратор же остается на месте. В результате последовательно открываются ячейки с мишенями, и осуществляется частотная инжекция мишеней (под действием гравитации) в канал формирования. Зависимость частоты подачи мишеней f [Гц] от угловой скорости вращения вкладыша ω [об/сек] выражается соотношением :

$$f = \frac{\omega t}{T}$$
 (t - шаг резьбы, T - шаг между ячейками в сепараторе).

Заливной оптический гелиевый криостат

ГК представляет собой сборку коаксиальных цилиндров с сужением в нижней части, где расположена тест камера (ТК) для оптических исследований криогенных мишеней (см. Рис.3.1). Корпус криостата (поз.1) представляет собой цилиндр с наружным диаметром 450 мм, выполненный из листовой нержавеющей стали. Внутри корпуса, в верхней части криостата, расположен сосуд для жидкого азота (поз.2) с теплопроводящим экраном (поз.3), выполненным из листовой меди марки М1. На боковой поверхности нижней части азотного сосуда размещены корзины (поз.4) с активированным углем (адсорбентом), перекрытые пластинами пористой меди.

Сосуд для жидкого гелия (поз.5) расположен в средней части криостата. Жесткость элементов криостата (таких как корпус, азотный и гелиевый сосуды) обеспечивается специальными «ребрами жесткости», выполненными в виде V-образных гофров и расположенных по периметру сосудов. В центральной части криостата размещается вставка (поз.6). Нижняя часть криостата заканчивается оптической тестовой камерой или ТК (поз.С), содержащей также устройство углового позиционирования (УП) готовой криогенной мишени.

Во внутреннем объеме криостата поддерживается разрежение на уровне 10⁻² тор (при комнатной температуре), которое необходимо для снижения конвективного и теплопроводного теплообмена между поверхностями криостата с различной температурой. Откачка остаточного газа производится через вакуумный клапан Ду-16 (поз.7; показан условно), расположенный внизу на внешней поверхности криостата. Для снижения теплообмена излучением, внутренняя поверхность корпуса ГК (поз.1), наружные поверхности сосудов (поз.2) и (поз.3), наружные и внутренние поверхности теплопроводящих экранов, а также наружная поверхность модуля (поз.В) тщательно отполированы и покрыты многослойным экраном из майларовой пленки, что дополнительно снижает степень черноты поверхностей.

Сосуд (поз.2) для жидкого азота (N_2) прикреплен к крышке корпуса криостата при помощи трех трубок-подвесов, которые одновременно служат для заливки жидкого N_2 и выхода его паров.

Сосуд (поз.5) для жидкого гелия (Не) также прикреплен к крышке корпуса тремя трубками-подвесами, по одной из которых производится заливка жидкого Не, по другой в момент заливки обеспечивается выход паров Не. Здесь же размещается датчик измерения уровня жидкого гелия. В третьей трубке (поз.9) расположено устройство в виде клапана с тягой (поз.11), которое служит для регулировки подачи жидкого, либо парообразного Не во вставку (поз.6) через теплообменник (поз.10) тестовой камеры (поз.С). Вывод отработанных паров Не из вставки (поз.6) осуществляется по каналу (поз.12).

Конструкция криостата является легко разборной, что обеспечивает возможность доступа к основным функциональным узлам. Внешние разъемные соединения корпуса и трубок подвесов (6 шт) криостата имеют фланцевую вакуумно-плотную конструкцию с металлическим уплотнением (поз.13). Для замены КФ и вставки в целом, в верхней части криостата имеется фланцевое соединение (поз.14) с металлическим уплотнением. При необходимости доступа к тестовой камере, на нижней части корпуса имеется разъемное соединение с металлическим уплотнением (поз.15).

Для проведения оптических исследований, внутренняя камера, съемный азотный экран и наружный кожух ТК снабжены оптическими окнами.

<u>Сменная вставка в шахту криостата</u>

В центральной части криостата размещается вставка (Рис.3.1 поз.6) состоящая из 2-х основных узлов:

1. защитно-шлюзовой модуль (ЗШМ) (Рис.3.1 поз.А), который служит для размещения МК; ЗШМ также содержит вакуумный затвор;

2. канал формирования (КФ) (Рис.3.1 поз.В), выполненный в виде трубчатой спирали (змеевик).

Принципиальная схема вставки показана на Рис.3.3.

ЗШМ содержит стальной фланец (поз.1) с гайкой (поз.2), в который вварены три вертикальных тонкостенных канала (поз.3, 4, 5) и трубка (поз.6). Внутри канала (поз.3) расположен ключ (поз.7) из тонкостенной стальной трубки 16х0.5, на конце которого закреплен мишенный контейнер (МК) (поз.8).

Ниже МК (поз.8) канал (поз.3) сужается, соединяется с вакуумным затвором (поз.9), и далее переходит в канал формирования (КФ) (поз.15), имеющий форму спиральной трубки, которая припаяна к наружной поверхности медной трубы (поз.10). Часть канала (поз.3), охватывающая МК (поз.8), выполнена из меди. КФ выполнен из медной трубки Ø6x1 мм.

В нижней части КФ стыкуется с ТК через уплотнение Вильсоновского типа. Готовая криогенная мишень инжектируется из КФ в ТК под действием гравитации

Трубка (поз.16) служит для вакуумирования внутреннего объема тестовой камеры.

На торце мишенного контейнера закреплен датчик температуры (поз.11), провода от которого идут по оси ключа (поз.7) и герметично выводятся через верхний конец ключа (поз.7).

Ключ (поз.7) вместе с МК (поз.8) может выниматься из канала (поз.3) через верхний его конец. Герметизация соединения ключа (поз.7) с каналом (поз.3) обеспечивается резиновой прокладкой и гайкой (поз.12). На хвостовике ключа (поз.7) выполнены лыски для обеспечения его вращения вокруг оси. Уплотнение вращающейся части ключа (поз.7) обеспечивается при помощи системы фторопластовых и резиновых колец.

Датчики температуры установлены также на внешней части канала (поз.3), в области расположения МК (поз.8), вакуумном затворе (поз.9) и медной трубе (поз.10) (в верхнем и нижнем ее концах). Провода от датчиков температуры выводятся наружу через трубку (поз.6) и штепсельный разъем (поз.13).

Внутри канала (поз.4) из тонкостенной стальной трубки 8x0,5 расположен шток вакуумного затвора (поз.9) с уплотняющим коническим элементом. Верхний конец штока выводится наружу через систему уплотняющих резиновых и фторопластовых колец, которые обеспечивают герметичность соединения и обеспечивают вращательно-поступательное перемещение штока.

Вакуумный затвор (поз.9) в закрытом положении обеспечивает герметичное уплотнение ЗМШ с расположенным внутри мишенным контейнером (поз.8) относительно трубки (поз.15) канала формирования.

Канал (поз.5) из стальной трубки 6х0,3 мм проходит рядом с каналами (поз.3 и 4) и заканчивается внутри ТК.

Над фланцем (поз.1) каналы (поз.3, 4 и 5) соединяются с коллектором (поз.14), который, в свою очередь, соединяется с системой вакуумирования.

Подготовка вставки к работе и работа производится в следующей последовательности.

- Нижние концы каналов (поз.15) и (поз.5) герметично впаиваются в верхний фланец внутренней гелиевой камеры ТК.

- Вставка устанавливается в криостат и герметично закрепляется в нем при помощи резиновой прокладки и гайки (поз.2).

- Мишенный контейнер (поз.8) с массивом оболочек, заполненных газообразным изотопом водорода (D₂, DT-смесь или др.), размещается внутри канала (поз.3) защитно-шлюзового модуля (ЗШМ). Процедура загрузки проводится при комнатной температуре.

- Коллектор (поз.14) своим одним концом соединяется с системой вакуумирования, а на второй конец коллектора устанавливается вакууметрическая лампа.

- Разъем (поз.13) соединяется с системой измерения температуры, что обеспечивает подключение датчиков температуры.

- Вакуумный затвор (поз.9) устанавливается в открытое положение; производится вакуумирование внутренних полостей вставки до давления остаточных газов (1-5)10⁻³ тор. Контроль разрежения осуществляется с помощью вакуумной лампы (поз.14), размещенной на колекторе; вакуумный затвор устанавливается в закрытое положение. - Заливка криоагентов (жидкий азот и гелий) в криостат; охлаждение МК до температуры, при которой его разгерметизация (удаление паразитного газа) не приведет к разрушению оболочек за счет образующегося перепада давления на стенке оболочки (T~20÷40 K)

- Одновременно производится охлаждение КФ и ТК. Контроль температуры осуществляется при помощи датчиков температуры, установленных на трубке (поз.10) и стенке ТК.

 Разгерметизация МК и удаление паразитного газа с помощью криогенного сорбционного насоса и повторное вакуумирование внутренних полостей ЗШМ и МК.

- Вакуумный затвор устанавливается в открытое положение.

- Вращением ключа (Рис.3.3 поз.7) открывается мишенный контейнер (поз.8), из которого, под действием гравитации, выходит одна из оболочек, проходит по каналу формирования (поз.15) и поступает в оптическую тестовую камеру (ТК) криостата.

Оптическая тестовая камера

Нижняя часть криостата заканчивается оптической тестовой камерой (Рис.3.1, поз. С), которая состоит из трех основных частей (Рис.3.4): внутренней гелиевой камеры (поз.1), азотного экрана (поз.2) и внешнего корпуса (поз.3) с окнами (поз.4 и 5). Указанные части раздельно крепятся к элементам ГК, имеющим разные температуры, чем обеспечивается их дистанцирование, и исключаются тепловые контакты.

Внутренняя камера (поз.1) состоит из корпуса квадратного сечения, двух съемных окон (поз.6) и крышки (поз.7) с вилкой типа РСГС 19 В. Вилка служит для герметичного вывода проводов от устройства позиционирования. На наружной поверхности корпуса камеры напаяны два параллельно соединенных теплообменника из медных трубок 4х0.5 мм (теплообменники на Рис.3.4 не показаны). Гелий из гелиевой емкости криостата проходит через эти теплообменники и сбрасывается в шахту криостата.

Внутренняя гелиевая камера (поз.1) герметично соединяется с шахтой криостата с помощью верхнего фланца.

Окна гелиевой камеры (поз.6) выполнены из кварцевого стекла марки КВ (ГОСТ 15130-79). Чтобы избежать появления трещин в стекле, для крепления окон введено нажимное кольцо (поз.8) из стали 12Х18Н10Т.

В качестве уплотнительного материала рекомендуется использовать индий. Конструкция гелиевой камеры, за исключением оправы стекол, выполняется из стали 12Х18Н10Т, шпильки – из бронзы БрОФ 6,5-0,15.

Азотный экран ТК (поз.2) выполняется из листового алюминиевого сплава АМЦ толщиной 1.5 мм. Экран имеет съемное дно и два съемных окна с кварцевыми стеклами. Экран крепится к азотному экрану криостата 20-ю винтами МЗ, что обеспечивает тепловой контакт этих элементов с помощью регулировочных винтов.

Корпус (поз.3) выполнен в виде сварной конструкции с тремя фланцами. Верхний фланец служит для стыковки с корпусом криостата, два боковых – для установки окон (поз.4 и 5).

Отверстия под болты в верхнем фланце имеют овальную форму, что позволяет разворачивать корпус относительно криостата в пределах 8°.

Неподвижное окно (поз.4) выполнено в виде фланца с вклеенным кварцевым стеклом. Подвижное окно содержит два фланца, соединенных мембраной. Один из фланцев закреплен

на корпусе, второй фланец с вклеенным стеклом, благодаря гибкости мембраны, может перемещаться вдоль оптической оси или поворачиваться с помощью регулировочных винтов.

В корпусе, в качестве конструкционного материала, рекомендуется применять сталь марки 12X18H10T. Конструкция герметичная. Уплотнения съемных окон выполнены из вакуумной резины.

Внутри гелиевой камеры крепится устройство углового позиционирования криогенной мишени. Это крепление осуществляется с помощью собственных распорных винтов, фиксирующихся в кольцевой проточке нижнего фланца. Предусмотрен также вариант крепления устройства позиционирования на крышке (поз.7).

Чертеж общего вида одного из вариантов устройства позиционирования (УП-1) показан на Рис.3.5. Данная конструкция применима в режиме однократного формирования криогенной мишени. УП-1 обеспечивает вращение мишени относительно вертикальной оси, что позволяет получать теневое изображение при различных углах поворота мишени. Минимальный шаг проекции составляет 1.3^{0} при точности позиционирования 1.6 мин. Полный угол сканирования составляет 360^{0} .

Данное устройство применяется для накопления базы проекционных данных, которые затем используются для прецизионной характеризации качества криогенной мишени методом томографии. Данное устройство неоднократно использовалось в составе 100 проекционного видео-томографа, созданного в ФИАН [3].

УП-1 включает в свой состав (см. Рис.3.5) подставку (поз.1), корпус (поз.3) с шаговым двигателем (поз.4), редуктор на основании (поз.5), корпус (поз.13) со шпинделем (поз.12) и крышку (поз.15) с накопителем мишеней.

Подставка помещается внутри ТК и фиксируется четырьмя винтами (поз.2). На подставку устанавливается корпус (поз.3) со стандартным шаговым двигателем типа $\mathcal{Д}ШP20-18-00$ (минимальный угловой шаг 18°, систематическая погрешность шага ±5%) (поз.4). К фланцу корпуса винтами крепится основание редуктора (поз.5). Редуктор соосный двухступенчатый, ведущая шестерня (поз.6) которого насаживается на валик шагового двигателя. На оси (поз.8) устанавливается блок шестерен (поз.7). Крутящий момент поводком (поз.10) передается на шпиндель (поз.12). Шпиндель установлен в корпус (поз.13) на опорах скольжения. Корпус шпинделя двумя стойками (поз.14) соединен с основанием редуктора. На торце шпинделя имеется гнездо для установки мишеней. Шпиндели сменные, отличающиеся размером гнезда для мишеней, что позволяет исследовать мишени в широком диапазоне диаметров. На корпусе шпинделя помещается крышка (поз.15), имеющая окна для обзора мишени и резьбовое отверстие для установки приемной воронки (поз.16) для мишени, поступающей из канала формирования. Для обеспечения соосности оси мишени и оптической оси ТК используются регулировочные прокладки между подставкой и корпусом шагового двигателя.

По окончании исследований мишень выводится из зоны оптического контроля на специальный лоток, по которому транспортируется (под действием гравитации) в мишенный накопитель. Для предотвращения выброса газа в ТК (в случае разрушения мишени) в накопитель помещают поглотитель изотопов водорода (порошок титана, активированный уголь или другой водородо-поглощающий материал).

<u>Рама крепления</u>

Рама крепления (Рис.1.1 поз.3) МФ на оптическом столе предназначена для обеспечения необходимой жесткости МФ при проведении сканирования криогенной мишени. Рама состоит из верхнего и нижнего хомутов, прикрепленных к стойке (стойка состоит из 4-х алюминиевых толстостенных труб, расположенных вертикально). Стойка, в свою очередь, крепится на опорном оптическом столе.

<u>Система автоматизации и контроля</u>

САК предназначена для контроля и поддержания рабочих параметров FST- эксперимента, а также для управления работой исполнительных механизмов МФ в ручном и автоматическом режиме.

Устройства, которые относятся к элементам САК, размещаются в вертикальной стойке и присоединяются к соответствующим узлам МФ.

В состав САК входят 10 датчиков измерения температуры и 2 нагревателя. Зоны размещения датчиков температуры (Т1-Т8) и нагревателей (Н1-Н2) следующие: Т1- на МК; Т2 и Н1- вакуумный затвор; Т3- на входе в КФ; Т4- на 2/3 высоты КФ; Т5- на выходе из КФ в ТК; Т6, Т7 – стенка ТК (верх и низ); Т8 и Н2- в месте размещения мишени на УП; Т9,Т10-резерв. Требования по температуре в зонах размещения соответствующих датчиков показаны в Таблице 3.1, а также на схеме (см. Рис.3.6).

TT ()) (T (>
Tabuua + I	Грепования по	темпепатупе	в месте	пазмещения	COOMREMCME	VIUIUX	датчиков
1 40.11114 5.1.1	peoodanian no	meshnepunype	0 meenie	passicujentist	coomocmemo	y 10 00 00 00.00	oum made

No	Наименование этапа работы	T1-MK	T2 – вакуумный затвор	Т3 - вход в КФ	Т4 – расположен на 2/3 высоты КФ	Т5 - выход из КФ	Т6, Т7 – стенка ТК	T8- размещения мишени на УП	Примечания
1	Загрузка МК	300 K	300 K	300 К	300 К	300 К	300 K	300 K	-
2	Разгермети- зация МК	40- 20К							-
3	Удаление па- ра- зитного газа	40- 20K	40- 20K						Размещение нагревателя Н1 в обл.Т2
4	Формирование крио слоя	40- 20К	40- 20К	20- 5К	4.2- 5K	4.2- 5К			-
5	Исследование готовой ми- шени (режим 1)						4.2-5K	4.2-5K	-
6	Исследование готовой ми- шени (режим 2)						4.2- 40K	4.2- 40K	Размещение нагревателя Н2 в обл.Т8 и Т7



Puc.3.1.







Рис.3.2. Конструкция мишенного контейнера с дозированной подачей мишеней в МФ: 1- корпус; 2 – вкладыш; 3 – сепаратор; 4 – запорный эле-мент (конус); 5 – втулка; 6 – пробка; 7 – шарик, А – бурт, В – шип.



Рис.3.3. Сменная вставка в шахту криостата



Рис.3.4. Оптическая тестовая камера.



Рис.3.5. Устройство позиционирования типа УП-1: 1- подставка, 2- винт установовчный, 3- корпус, 4- двигатель шаговый, 5- основание редуктора, 6- шестерня, 7блок шестерен, 8- ось, 9- колесо зубчатое, 10- поводок, 11- водило, 12- шпиндель, 13- корпус. 14- стойка. 15- крышка. 16- воронка.



Рис.3.6. Схема размещения датчиков температуры (Т1-Т8) и нагревателей (*H1-H2*) в модуле формирования.
Литература

- 1. I.V.Aleksandrova, S.V.Bazdenkov, V.I.Chtcherbakov, et al. *An efficient method of fuel ice formation in moving free standing ICF/IFE targets.* J.Phys.D: Appl.Phys. **37**, 1163, 2004
- E.R.Koresheva, I.E.Osipov, I.V.Aleksandrova. Free-standing target technologies for inertial confinement fusion: fabrication, characterization, delivery. Laser and Particle Beams 23, 563, 2005
- 3. E.R.Koresheva, I.E.Osipov, I.V.Aleksandrova, et al. *Creation of a diagnostic complex for the characterization of cryogenic laser-fusion targets by the method of tomography with probing irradiation in the visible spectrum.* J.Russian Laser Research **28** (2), 163, 2007
- 4. E.R.Koresheva, A.I.Nikitenko, I.V.Aleksandrova, et al. *Possible approaches to fast quality control of IFE targets*. Nuclear Fusion **46**, 890, 2006.



Совещание конструкторской группы проекта МНТЦ №3927: И.Е.Осипов, Е.Р. Корешева, Е.Л. Кошелев, В.А. Калабухов, И.Д.Тимофеев, Г.С. Усачев.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Необходимым элементом современных исследований в области ИТС является механический макет реактора (ММР) - модульное устройство, предназначенное для отработки линии поточного производства, доставки и синхронного облучения топливных мишеней с частотой 1 – 15 Гц.

Научно-исследовательская работа, выполняемая ФИАН в направлении создания ММР, включает всесторонний анализ различных технологических подходов к изготовлению сферических криогенных мишеней реакторного масштаба, а также проектирование устройства изготовления и сборки компонентов мишени, доставки криогенных мишеней в экспериментальную вакуумную камеру и точное размещение мишени в зоне взаимодействия.

В обзорных препринтах серии *"Криогенные мишени для реактора"* представлены результаты, полученные в следующих направлениях:

Часть І. Диффузионное заполнение топливом сферических оболочек

Обсуждается первый этап цикла FST, а именно, этап диффузионного заполнения массива сферических незакрепленных оболочек газообразным топливом до давления ~ 1000 атм при 300 К. Для заполнения топливом реакторных мишеней создан пилотный образец компактной системы заполнения, запуск которой был осуществлен в 2005 году. В настоящее время созданный пилотный образец используется для обслуживания лазерных и криогенных экспериментов в РФЯЦ-ВНИИЭФ (Россия, г. Саров).

Часть II. Характеризация криогенных мишеней

Обсуждается вопрос обеспечения средств контроля и получения точной информации о параметрах криогенной мишени, характеризация которой является неотъемлемой стадией при ее производстве и доставке в реакторную камеру. В работе представлены результаты по созданию алгоритмов реконструкции с различной информационной структурой, включая разработку сценария контроля и построение соответствующей системы характеризации для мишеней различного дизайна, включая мишени реакторного масштаба.

■ Часть III. МЕТОД FST: формирование твердого водородного топлива внутри движущейся сферической оболочки

Обсуждается уникальный FST- метод, в основу которого положен принцип работы с движущимися бесподвесными мишенями, что позволяет осуществлять формирование и доставку криогенных топливных мишеней в непрерывном режиме или с необходимой частотой. Мишень остается свободной на каждой ступени замкнутого производственного цикла «заполнение \Rightarrow формирование \Rightarrow доставка».

Разработана концепция нового модуля FST- формирования и выполнено его эскизное проектирование для строящейся в Европе лазерной установки класса HiPER ($E_i \sim 200$ кДж, $\nu > 1$ Гц, диаметр мишени > 2 мм).

Показано, что именно метод FST является перспективным путем решения проблемы частотного производства и инжекционного транспорта криогенных мишеней без разрушения, а также организации производственного процесса на будущих реакторах.

Стадию доставки криогенной мишени планируется обсудить в следующем препринте ФИАН из серии *"Криогенные мишени для реактора"*.

Подписано в печать 22.04.2014 г. <u>Формат 60х84/8. Заказ №21. Тираж 140 экз. П.л 27,5.</u> Отпечатано в РИИС ФИАН с оригинал-макета заказчика 119991 Москва, Ленинский проспект, 53. Тел. 499 783 3640