УДК 621.039.633

КРИОГЕННОЕ ВОДОРОДНОЕ ТОПЛИВО ДЛЯ УПРАВЛЯЕМОГО ИНЕРЦИАЛЬНОГО ТЕРМОЯДЕРНОГО СИНТЕЗА (FST-ФОРМИРОВАНИЕ КРИОГЕННОГО СЛОЯ ТОПЛИВА В ДВИЖУЩЕЙСЯ БЕСПОДВЕСНОЙ ОБОЛОЧКЕ: ТЕОРИЯ И ЭКСПЕРИМЕНТ)

И.В. Александрова¹, Е.Р. Корешева^{1, 2}, О.Н. Крохин^{1, 2}, И.Е. Осипов³

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

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

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

Результатом многолетней работы авторов явилось создание в Физическом институте им. П.Н. Лебедева (ФИАН) уникальной технологии быстрого FST-формирования мишеней для непрерывного пополнения криогенным водородным топливом зоны термоядерного горения в установках ИТС. Фундаментальное отличие метода FST от традиционного подхода — это положенный в его основу принцип работы с движущимися бесподвесными мишенями, что позволяет осуществлять формирование и инжекцию в лазерный фокус дешёвых топливных мишеней в непрерывном режиме или с необходимой частотой. Именно поэтому метод FST является перспективным путём решения проблемы поточного формирования и инжекционного транспорта криогенных топливных мишеней, а также организации производственного процесса на будущих реакторах. В настоящей работе представлены оригинальные результаты большого цикла теоретических и экспериментальных исследований, полученные в ФИАН по программе FST-формирования криогенных мишеней с ультрадисперсной структурой топлива. По существу, речь идёт о получении новых функциональных структур топливного слоя, обладающих долгоживущими характеристиками качества. Это имеет первостепенное значение для практической реализации требований по физике сжатия мишеней, а также сохранения качества топливного слоя при доставке готовых мишеней в камеру реактора ИТС.

Ключевые слова: инерциальный термоядерный синтез (ИТС), метод FST для формирования мишеней, ультрадисперсная структура криогенного водородного топлива.

CRYOGENIC HYDROGEN FUEL FOR CONTROLLED INERTIAL CONFINEMENT FUSION (FST-FORMATION OF CRYOGENIC FUEL LAYER IN MOVING FREE-STANDING SHELLS: THEORY AND EXPERIMENT)

I.V. Aleksandrova¹, E.R. Koresheva^{1, 2}, O.N. Krokhin^{1, 2}, I.E. Osipov³

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

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

³Co Ltd «Inter RAO UES Power Efficiency Centre», Moscow, Russia

Long-term research effort of the Lebedev Physical Institute (LPI) results in creation of a unique technology of rapid free-standing target (FST) production for continuous supply with a cryogenic hydrogen fuel of the burn area in the ICF facilities. A fundamental difference of the FST layering method from generally accepted approaches is that it works with moving unmounted targets, which allows one to economically fabricate large quantities of such targets and to continuously (or at a required rate) inject them at the laser focus. For that very reason the FST layering method is a promising candidate for development of ICF transmission line at a high rep-rate capability intended for using in future power plants for process engineering. In this paper, the original results of the theoretical and experimental work in the scope of cryogenic layers formation with an ultrafine structure are presented. Such layers have a potential to advance materials for application to fusion targets fabrication in the form that meets the requirements of implosion physics. They are referred to as layers with self-inherent survival features that is of critical importance for finished target delivery into ICF reaction chamber.

Key words: inertial confinement fusion (ICF), free-standing target (FST) layering method, ultrafine structure of cryogenic hydrogen fuel.

ВВЕДЕНИЕ

В работах [1, 2] особо подчёркивалось, что на современном этапе развития ИТС быстрыми темпами развиваются те направления, которые связаны с разработкой эффективных методов формирования твёрдого слоя топлива внутри полых оболочечных конструкций, например, внутри полимерных оболочек различной толщины и конфигурации. При этом получаемые криогенные мишени должны быть бесподвесными, т.е. свободными или, другими словами, незакреплёнными на каком-либо подвесе. Это является принципиальным условием, которое позволит осуществить непрерывное формирование и свободный транспорт мишеней в системах ИТС [3].

В течение последних 20 лет под руководством ФИАН в России на основе метода FST [1—47] создана научная, инженерная и технологическая база для построения демонстрационной установки непрерывного формирования криогенных мишеней реакторного класса с ультрадисперсной структурой топлива, а также их инъекционной доставки в камеру взаимодействия реактора ИТС (табл. 1). Основные блоки установки для FST-производства криогенных мишеней показаны на рис. 1.

Таблица 1. Метод FST — идеальный инструмент для формирования сферически симметричных изолированных ультрадисперсных слоёв криогенного топлива для реактора ИТС [1—47]

FST-условия	Результат	Эффект
Высокие скорости охлаждения 1—50 K/c	Изотропное ультрадисперсное топливо Минимальное время формирования топливного слоя: менее 15 с	Распространение ударной волны через изотропный твёрдый слой Минимизация запасов трития при производстве мишеней
Высокоплавкие добавки к топливу 0,5—20%	Стабилизация размера зерна Рост механической и тепловой устойчивости слоя в изотропном ультрадисперсном состоянии	Требуемая шероховатость слоя Сохранение качества мишени при её доставке в фокус мощной лазерной установки или реактора
Формирование слоя в движущихся оболочках	Сферически симметричный слой Частотное формирование криогенных топливных мишеней	Мишени требуемого качества Массовое производство мишеней и доступная цена

Рис. 1. Основные блоки установки для производства криогенных мишеней методом FST: 1 — FST-модуль формирования криогенных топливных мишеней; 2 — набор саботов для мишени; 3 — узел для формирования защитной крышки, 4 — вращающийся револьвер для сборки инъекционного ансамбля «мишень + сабот + крышка», 5 — коллектор (а); узел 2 в разрезе (б)

Согласно методу FST для реализации поточной линии мишень остаётся свободной на каждом шаге замкнутого производственного цикла, основные этапы которого заполнение—формирование—доставка. Условия облучения мишени и методы её защиты от внешней среды в процессе доставки должны быть согласованы [1—3, 7—12], поскольку нарушение качества мишени при её транспорте и позиционировании в лазерном фокусе камеры взаимодействия рассматривается как разрушение мишени.

В работах [13, 14, 39—42] детально обсуждается первый этап FST-цикла: заполнение массива полимерных оболочек газообразным топливом из изотопов водорода (включая радиоактивный тритий в составе эквимольной DT-смеси) до давления 1000 атм. при 300 К для различных материалов и конструкций оболочки.

Анализ современного состояния, а также новейших направлений в области создания систем инъекционной доставки мишени (третий этап) можно найти в серии работ [1—6, 15, 16, 27, 31—36, 47].

Наиболее важным аспектом, обсуждаемым в данной работе, является изучение физических закономерностей, лежащих в основе второго этапа — процесса FST-формирования твёрдого топливного слоя внутри движущихся бесподвесных оболочек, а также разработка численной модели для их адекватного математического описания [19—21]. При этом будут рассматриваться классические криогенные мишени (мишени прямого сжатия) любого уровня, включая мишени реакторного класса.

Криогенные мишени прямого сжатия образуют линейку, начало которой соответствует дизайну мишеней для установки OMEGA (табл. 2) [48]. 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) [49]. Радиус мишени определяется как $R_{\text{OMEGA}} \sim 1/3 R_{\text{NIF}}$ (согласно соотношению (энергия) $\sim$ (радиус)³), а твёрдое топливо должно быть сформировано в виде сферически симметричного слоя толщиной $W = 100$ мкм на внутренней поверхности тонкой полимерной оболочки диаметром $\varnothing \sim 1$ мм с толщиной стенки ΔR в диапазоне 1—5 мкм [50].

Т а б л и ц а 2. Варианты дизайна мишеней для лазерных установок OMEGA и NIF

Параметры мишеней	OMEGA, $E_1 = 30$ кДж	NIF, $E_1 = 1,5$ МДж
R	460 мкм	1690 мкм
ΔR	3 мкм	3 мкм
W	100 мкм	340 мкм
$(\rho R)_{\text{peak}}$	~ 300 мг/см ²	~ 1200 мг/см ²
Y_n	$1,8 \cdot 10^{14}$	$2,5 \cdot 10^{19}$

Примечание: Y_n — нейтронный поток.

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 создаётся мощная лазерная установка HiPER (High Power Laser Energy Research) [51], во Франции — установка LMJ (Laser Mega Joule) [52].

Дизайн криогенной мишени для установки HiPER находится на стадии концептуализации и окончательно не утверждён. Предварительно рассматривается так называемая базовая мишень класса HiPER «Baseline Target-2» (BT-2), представленная в двух модификациях: BT-2 — сферическая полимерная (CH) оболочка ($\varnothing \sim 2$ мм, $\Delta R = 3$ мкм) с замороженным на её внутренней поверхности топливным слоем (211 мкм) и BT-2a — аналогичная тонкая оболочка ($\varnothing \sim 2$ мм, $\Delta R = 3$ мкм) с прилегающим слоем «полимерная пена + DT» (70 мкм), за которым идёт твёрдый 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 [53] (мишень «Накаи»), который представляет собой полимерную оболочку диаметром $\varnothing = 4$ мм с толщиной стенки $\Delta R = 45$ мкм. Толщина твёрдого слоя топлива составляет $W = 200$ мкм.

Производство мишеней реакторного класса требует развития таких методов формирования слоя, которые будут удовлетворять требованиям по физике сжатия мишеней: отклонения от сферичности и концентричности $< 1\%$, локальные неоднородности на поверхности топливного слоя < 1 мкм [1, 2]. Подчеркнём, что для реализации схемы ИТС необходимо не только сформировать требуемую структуру топлива, но и обеспечить её структурную и фазовую стабилизацию в процессе доставки мишени [1, 2]. Поскольку криогенный слой является наиболее чувствительным элементом мишени, то методы формирования слоя с долгоживущими характеристиками качества становятся одним из ключевых моментов в вопросе о производстве криогенного водородного топлива для реактора.

Хорошо известно, что применение наноструктурированных материалов позволяет понизить чувствительность образцов к температурным и механическим воздействиям. Именно поэтому наноматериалы рекомендуется использовать в основных элементах реактора ИТС, таких, как стенка реакторной камеры и активная среда твёрдотельного лазера. Обзор по этой теме можно найти в работе [1]. В последнее время становится актуальным вопрос о разработке новых технологий, которые позволят получить в наноструктурированном состоянии и криогенный топливный слой [1—3] (в зарубежной терминологии «nanolayering technologies»).

С этой точки зрения на разработку методов формирования мишени накладываются дополнительные условия, а именно:

— криогенный топливный слой должен быть изотропным и обладать повышенной тепловой и механической устойчивостью в процессе доставки. Особенность процесса доставки заключается в требованиях на частотность доставки (1—10 Гц), точность доставки (± 20 мкм) и температурный ре-

жим доставки. Криогенная мишень должна иметь в момент облучения лазером температуру не выше 18,5 К. При этом температура стенки самой реакторной камеры может достигать значительных величин. Так, например, для камеры реактора SOMBRERO указанная величина составляет 1758 К [54]. Кроме того, на стадии ускорения в инжекторе допустимые перегрузки на мишень могут составлять до 1000g [51];

— криогенный топливный слой должен быть изотропным, чтобы в процессе сжатия мишени реализовать требуемые плотности и температуры для осуществления реакций синтеза. Исследования в этом направлении интенсивно ведутся сейчас в России, Испании и США (табл. 3). В работе [55] прямо подчёркивается необходимость формирования нанокристаллических мишеней для установки класса NIF: «Наши результаты свидетельствуют о том, что именно нанокристаллические слои гарантируют малые флуктуации во фронте ударной волны, что минимизирует появление опасных неустойчивостей при сжатии мишеней класса NIF».

Т а б л и ц а 3. Требования на функциональные параметры материалов мишени: структура всех компонентов мишени должна быть изотропной

Технологии формирования	Оболочка мишени	Топливный слой
Основные материалы	Компактные полимеры, пористые полимеры, бериллий (Be)	Твёрдые изотопы водорода и их смеси
Характерные свойства и особенности, влияющие на выбор технологии	Существенная анизотропия в скорости звука для кристаллов Be ~20% [56]	Существенная анизотропия в скорости звука для H ₂ и D ₂ >20% [57]
Исследования по теме	США [56]	Россия, Испания [58, 59]
Требования на размер зерна	Менее 10 мкм	Менее 1 мкм
Предложения по новым направлениям развития	Использовать дейтерид бериллия (Россия, ФИАН) [60]	Метод FST (Россия, ФИАН) [7, 11, 23—25, 46]

Таким образом, основные вопросы, стоящие в настоящее время в исследованиях по ИТС, — это влияние микроструктуры твёрдого топлива на качество криогенного слоя и сохранение этого качества вплоть до момента облучения мишени импульсом мощного лазерного излучения.

В работах [35, 36] проведено численное моделирование поведения криогенного водородного топлива с различной структурой слоя в условиях тепловых перегрузок, а именно: изучался эффект деградации слоя, обусловленный переносом тепла от горячей стенки камеры к топливному ядру. Рассматривались два типа слоёв: анизотропные молекулярные кристаллы и изотопные ультрадисперсные слои, полученные по методу FST. Для исследования данной проблемы был выбран подход, основанный на решении задачи Стефана для сингулярно возмущённой системы полулинейных уравнений теплопроводности с нелинейными краевыми условиями, причём в случае анизотропных слоёв использовалась векторная форма коэффициента теплопроводности слоя. Результаты моделирования показали, что применение изотропного ультрадисперсного топливного слоя (вместо традиционного анизотропного кристаллического) позволяет подавить скорость роста возмущений слоя под действием тепловых нагрузок на мишень.

Таким образом, можно считать доказанным, что в настоящее время именно метод FST обеспечивает получение мишеней с заданной структурой криогенного водородного топлива, обладающей долгоживущими характеристиками качества (в зарубежной терминологии «layers with self-inherent survival features»).

РАЗРАБОТКА БАЗОВОЙ МОДЕЛИ FST-ФОРМИРОВАНИЯ СЛОЯ

Мы начнём 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 ФИАН для диаметра оболочки ~1 мм. При проведении расчётов использовались данные информационного анализа по свойствам топливного и других материалов [60—65], которые применяются при производстве криогенных мишеней различного дизайна.

Как показали эксперименты, проведённые в ФИАН (схема FST-модуля дана на рис. 2), время формирования криогенного слоя внутри замкнутой полимерной оболочки ($\varnothing \sim 1$ мм) не превышает 8 с для цилиндрического канала (толщина слоя 88 мкм) и 12 с для спирального канала (толщина слоя 30 мкм). Анализ всей серии экспериментов позволяет заключить, что в первом приближении время формирования криогенного слоя $\tau_{\text{form}} \sim 10$ с можно рассматривать в качестве реперной точки при математическом моделировании метода FST.

Рис. 2. Метод FST обеспечивает быстрое формирование и симметризацию твёрдых ультрадисперсных слоёв топлива: *a* — схема FST-модуля; *б* — мишень до начала FST-формирования слоя (топливо в состоянии «стёкшая жидкость + пар»); *в* — мишень после FST-формирования (симметричный твёрдый слой); *г* — спиральный канал формирования (1); *д* — спиральный канал формирования (1) в сборке с тестовой камерой (2)

Процесс формирования слоя внутри массива движущихся оболочек по методу FST осуществляется при инжекционном транспорте бесподвешенной мишени между основными функциональными элементами системы: мишенный контейнер—модуль формирования—тестовая камера. 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, за счёт чего и обеспечивается вымораживание топлива в движущейся оболочке. В канале мишени движутся в быстрой последовательности, одна за другой, что позволяет реализовать частотную инжекцию готовых криогенных мишеней в тестовую камеру.

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

Канал формирования (КФ) криогенных мишеней методом FST. КФ представляет собой специальную вставку в криостат, определённая часть которой находится в парах кипящего гелия (He). Используя нагреватель, можно изменять температуру стенок тестовой камеры, присоединённой к КФ в нижней его части, в диапазоне от 4,2 до 40 К. Среда, непосредственно окружающая мишень внутри канала, представляет собой вакуум (стандартные условия) или теплообменный гелий при давлении в диапазоне от $3 \cdot 10^2$ до 10^{-3} Па (особые условия эксперимента). В экспериментах используются КФ различного дизайна [11, 25, 44, 45]:

- цилиндрические (широкие и узкие при вертикальной и наклонной геометрии эксперимента);
- спиральные (сама спираль может быть одиночной, двойной или даже в форме трилистника);
- комбинированные с переменными параметрами (могут состоять из нескольких спиралей, для каждой из которых существует свой набор параметров: угол захода спирали, её шаг и высота).

При движении мишени по КФ в результате её контакта с холодной стенкой последнего происходит охлаждение мишени с последующей конденсацией жидкой фазы и вымораживанием топливной смеси на внутренней поверхности полый сферической оболочки.

Оптическая тестовая камера (ТК) — промежуточный узел между КФ и системой инжекционной доставки. ТК фактически представляет собой накопитель мишеней (см. рис. 2 и 3), который используется в FST-экспериментах для температурной [7, 8, 11, 25] и томографической [17, 18, 22, 26—29, 43] диагностики параметров готовых криогенных мишеней, а также служит промежуточным узлом в системе транспорта мишеней в инжектор [31].

Рис. 3. Инжекция мишеней из модуля формирования в тестовую камеру при температуре $T = 4,2$ К: а — инжекция мишени в ТК, кадр № 1 (1), кадр № 2 (2); б — накопление мишеней в ТК после инжекции, в — текущая частота повторения $\nu = 0,1$ Гц

Два основных принципа метода FST:

- динамическая симметризация жидкого топлива, т.е. симметризация слоя, обусловленная свободным вращением мишени при её движении вдоль КФ;
- вымораживание жидкого топлива за счёт контактной теплопроводности между движущейся оболочкой и стенкой КФ.

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

- скорость охлаждения мишени: при FST-формировании она составляет от 1 до 50 К/с. Реализация высоких скоростей охлаждения позволяет быстро (менее чем за 15 с) сформировать криогенный слой в ультрадисперсном состоянии;
- состав топлива: при FST-формировании слоя используются высокоплавкие добавки к топливу в количестве 0,5—20%. Наличие легирующих добавок позволяет стабилизировать получаемую ультрадисперсную структуру слоя. В случае DT-топлива (эквивалентная композиция включает 50% молекул DT, 25% D_2 и 25% T_2) тритий играет роль такой добавки по отношению к остальным компонентам смеси;
- начальная температура мишени T_{in} (рис. 4), которая определяет одну из ключевых величин τ_{liquid} — время существования жидкой фазы топлива в процессе охлаждения мишени. Это время должно быть достаточным для симметризации жидкого криогенного слоя при движении мишени по КФ;

Рис. 4. Исходное количество жидкой фазы зависит от начальной температуры мишени, оболочка из полистирола $\varnothing = 1$ мм, давление заполнения $P_f = 353$ атм. (H_2)

— температурный профиль вдоль КФ, зависящий при прочих равных условиях от материала, из которого изготовлен канал;

— геометрия КФ — определяющими факторами являются тип спирали (одиночная, двойная, трилистник) и её параметры (угол захода, диаметр, высота и ширина спирали). В любом случае именно эти величины будут контролировать время пребывания мишени в КФ, 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 класса [46].

Таким образом, цель применения FST-технологий заключается в демонстрации преимуществ использования незакреплённых оболочек при реализации основной производственной цепочки: заполнение оболочек топливом — формирование топливного слоя — доставка готовых криогенных мишеней в фокус мощной лазерной установки или реактора ИТС.

При реализации этой схемы одним из важнейших направлений является моделирование этапа формирования слоя при охлаждении мишени за счёт контактной теплопроводности между движущейся оболочкой и стенкой КФ.

Механизм отбора тепла из мишени. Механизм отбора тепла из мишени является ключевым моментом в образовании криогенного слоя (рис. 5). 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 нерадиальный градиент температуры, в гравитационном поле жидкая фаза успевает стечь на дно покоящейся мишени.

Рис. 5. Механизм отбора тепла из мишени (КФ — канал формирования, He — жидкий гелий): а — метод FIF; б — метод FFT; в — метод FST

Время стекания для мишени $\varnothing \sim 1$ мм составляет $\tau_{\text{gravity}} \sim (2R/g)^{1/2} \sim 10$ мс (g — ускорение свободного падения), что заведомо меньше наблюдаемого времени формирования слоя ~ 10 с. Следовательно, корректное математическое описание процесса предполагает существенно неоднородную модель. При этом, однако, эффекты «неоднородности» играют лишь количественную роль и могут изменить время формирования слоя лишь в разы, тогда как есть физически важный параметр, изменение которого приводит к «качественному» изменению — на порядки. Речь идёт о темпе отвода тепла с поверхности мишени, т.е. о внешнем граничном условии. Поэтому, оценивая роль механизма отбора тепла, в первом приближении можно ограничиться одномерной сферически симметричной моделью при нахождении величины τ_{form} .

Быстрый отбор тепла реализуется, когда вся мишень целиком погружена в теплообменное вещество (рис. 5, а, так называемый метод fast isothermal freezing (FIF)). В эксперименте это обычно жидкий гелий. При этом время остывания вещества мишени и образования в ней криогенного слоя контролируется собственным временем переноса тепла в мишени и оболочке τ_{fuel} и τ_{shell} и составляет десятки миллисекунд.

Медленный отбор тепла реализуется за счёт излучения с поверхности оболочки, когда вся мишень целиком окружена вакуумом и находится в свободном падении в цилиндрическом канале, стенки которого охлаждаются снаружи жидким гелием (рис. 5, б, так называемый метод free fall target (FFT)). Это очень медленный процесс. Тепло внутри мишени успевает перераспределяться, а затем доставляется к внешней поверхности оболочки, откуда и излучается. Оценка τ_{form} с граничным условием в виде излучения «чёрного» тела даёт заведомо большое время $\tau_{\text{form}} \sim \sigma^{-1}$, где σ — излучательная способность «чёрного» тела.

Оценить, сколь медленно охлаждается мишень за счёт теплового излучения, довольно легко. Поэтому мы приведём соответствующие выкладки, чтобы в терминах «температура—время» дать более наглядное представление о динамике такого процесса.

Рассмотрим задачу об охлаждении мишени, находящейся в свободном полёте внутри цилиндрического вакуумированного КФ. Температура стенок канала вследствие их охлаждения жидким гелием постоянна и равна $T = 4,2$ К. Сделаем оценки для самых благоприятных условий отбора тепла, а именно: мишень представляет собой «чёрное» тело, перенос тепла излучением от стенок канала к поверхности мишени отсутствует, рассматривалась минимальная масса топлива (соответствует толщине криогенного слоя $W \sim 30$ мкм — минимальный топливный слой, представляющий экспериментальный интерес), при расчёте были взяты минимальные значения теплоёмкости оболочки и топлива. В этом случае время, требуемое для охлаждения мишени от температуры T_0 до температуры T_1 , можно оценить по формуле

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

где m_{fuel} и m_{shell} — масса топлива и оболочки соответственно; C_{fuel} и C_{shell} — теплоёмкости топлива и оболочки; R — радиус оболочки; $\sigma = \text{const} = 5,67 \cdot 10^{-8}$ Вт/(м²·К⁴).

Определим время охлаждения мишени от начальной температуры T_0 на небольшую величину ΔT . Результат интегрирования даёт следующее выражение для времени τ :

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

В табл. 4 приведено характерное время охлаждения τ для миллиметровой мишени, заполненной дейтерием (толщина стенки оболочки $\Delta R = 10$ мкм, толщина топливного слоя $W = 30$ мкм), при различных значениях T_0 и ΔT . Напомним, что температура, до которой необходимо охладить мишень, чтобы начал формироваться твёрдый слой из дейтерия, равна температуре тройной точки $T_{\text{тр}} = 18,7$ К.

Т а б л и ц а 4. Охлаждение мишени за счёт теплового излучения

ΔT	$T_0 = 300$ К	$T_0 = 100$ К	$T_0 = 40$ К
0,1 К	0,1 с	8 с	$3,5 \cdot 10^2$ с
0,5 К	0,5 с	40 с	$1,7 \cdot 10^3$ с
1,0 К	1,0 с	81 с	$3,5 \cdot 10^3$ с

Таким образом, механизм переноса тепла излучением не может рассматриваться как основной при формировании топливного слоя, что соответствует результатам экспериментов, полученных в ФИАН (рис. 6). В этом случае реализуется инжекция горячей мишени с газообразным водородом (H_2) из КФ в ТК при $T = 4,2$ К (см. рис. 6, кадр 1). Через 40 мс (кадр 2) конденсация H_2 образует жидкую каплю, па-

Рис. 6. Метод FFT: проброс мишени в цилиндрическом вакуумном канале, стенки которого охлаждаются жидким гелием. Результат: инжекция горячей мишени с газообразным H_2 из канала в ТК при $T = 4,2$ К (оболочка из стекла $\varnothing 300$ мкм, давление заполнения $P_f = 200$ атм.)

дающую на дно оболочки (кадры 3, 4, 5). Кадр 6 — жидкий H_2 растекается по оболочке за счёт смачивания её внутренней поверхности, а затем вымерзает непосредственно в ТК. Таким образом, формирование твёрдой фазы топлива происходит в ТК за счёт контактной теплопроводности между оболочкой мишени и дном ТК, а не за счёт излучения при свободном полёте мишени внутри цилиндрического вакуумного КФ.

«Умеренный» отбор тепла реализуется, когда лишь часть поверхности мишени, причём её малая часть, находится в тепловом контакте с окружающей средой (см. рис. 5, в, так называемый метод free standing target (FST), предложенный и развитый в ФИАН). Этот контакт происходит в месте прижатия оболочки мишени к стенке КФ. Прижимаясь, оболочка мишени слегка деформируется, и образуется контактное пятно. Площадь пятна очень мала, менее 1% 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 [19—21], находится в хорошем согласии с экспериментально наблюдаемым временем формирования криогенного слоя $\tau_{\text{form}} \sim 10$ с, которое мы условились рассматривать в качестве реперной точки при математическом моделировании метода FST. Поэтому естественно считать, что именно такой механизм отбора тепла реализуется на практике.

Решение задачи Стефана для случая вымораживания топливного слоя внутри полый сферической оболочки при вариации способа отвода тепла из мишени. Перенос тепла в одномерной сферически симметричной модели описывается в виде уравнения теплопроводности

$$\rho_1 C_1 \frac{\partial T_1}{\partial t} = \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} \left(r^2 k_1 \frac{\partial T_1}{\partial r} \right) \quad (1)$$

для каждой из трёх фаз вещества мишени — газообразной ($l = \text{gas}$), жидкой ($l = \text{liquid}$) и твёрдой ($l = \text{solid}$) и для вещества оболочки ($l = \text{sh}$), причём температура $T_1(r)$ непрерывна на границах раздела фаз и внутренней поверхности оболочки. Здесь ρ_1 — плотность, C_1 — теплоёмкость, k_1 — 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 $C_l(T)$, $k_l(T)$, ρ_{sh} полагаются известными [61, 62] и определяются путём интерполяции существующих экспериментальных данных. Плотности жидкой и твёрдой фаз как функции температуры $\rho_{\text{liquid}}(T)$ и $\rho_{\text{solid}}(T)$ также известны из работ [61, 62].

Формирование мишени представляет собой изохорический процесс, происходящий внутри полый оболочки при её охлаждении в канале формирования. Фазовые превращения при этом контролируются температурой и фазовой диаграммой вещества мишени на плоскости P — V (рис. 7).

Состояние топлива в мишени на плоскости P — V представляется отрезком прямой (изохора формирования, обозначенная на рис. 7 цифрами 1→2→3), опускающейся сверху вниз (мишень остывает). Переход газ→жидкость начинается, когда этот отрезок пересекает линию насыщения на фазовой диаграмме в точке T_s (температура начала процесса разделения газ→жидкость). При дальнейшем охлаждении мишени до температуры тройной точки T_{tr} (для H_2 $T_{\text{tr}} = 13,96$ К) происходит вымораживание криогенного слоя внутри замкнутой оболочки, т.е. осуществляется изохорический переход от жидкости к твёрдой фазе топлива.

При охлаждении мишени на этапе 1→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} :

$$P = \frac{R_g T}{\left(\frac{\mu}{\rho} \right) - b} - \frac{a \rho_{\text{gas}}^2}{\mu^2}, \quad (2)$$

Рис. 7. Фазовая диаграмма водорода в координатах «давление — удельный объём»

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

$$m_{\text{gas}}(t) \equiv \int_0^{r_{\text{gl}}(t)} \rho_{\text{gas}}(T) 4\pi r^2 dr, \quad (3)$$

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

Массы жидкой и твёрдой фаз

$$m_{\text{liquid}}(t) \equiv \int_{r_{\text{gl}}}^{r_{\text{ls}}} \rho_{\text{liquid}}(T) 4\pi r^2 dr; \quad (4)$$

$$m_{\text{solid}}(t) \equiv \int_{r_{\text{ls}}}^{R_0} \rho_{\text{solid}}(T) 4\pi r^2 dr, \quad (5)$$

будучи известны, служат для определения положения границ раздела фаз газ→жидкость ($r = r_{\text{gl}}(t)$) и жидкость→твёрдое тело ($r = r_{\text{ls}}(t)$). Сами же массы фаз $m_{\text{gas}}(t)$, $m_{\text{liquid}}(t)$, $m_{\text{solid}}(t)$ находятся из условий фазовых превращений на границах раздела фаз (задача Стефана):

$$\lambda_{\text{gl}}(T_{\text{gl}}) \frac{dm_{\text{gas}}}{dt} = 4\pi r_{\text{gl}}^2 \left(\left[k_{\text{gas}} \frac{\partial T}{\partial r} \right]_{r=r_{\text{gl}}} - \left[k_{\text{liquid}} \frac{\partial T}{\partial r} \right]_{r=r_{\text{gl}}} \right); \quad (6)$$

$$\lambda_{\text{ls}}(T_{\text{ls}}) \frac{dm_{\text{solid}}}{dt} = 4\pi r_{\text{ls}}^2 \left(\left[k_{\text{solid}} \frac{\partial T}{\partial r} \right]_{r=r_{\text{ls}}} - \left[k_{\text{liquid}} \frac{\partial T}{\partial r} \right]_{r=r_{\text{ls}}} \right), \quad (7)$$

здесь $\lambda_{\text{gl}}(T)$ и $\lambda_{\text{ls}}(T)$ — теплота фазовых переходов газ→жидкость и жидкость→твёрдое тело соответственно. Величины $T_{\text{gl}}(r = r_{\text{gl}})$ и $T_{\text{ls}}(r = r_{\text{ls}})$ — температура на границах раздела фаз. Уравнения (6) и (7) дополняются также законом сохранения вещества в мишени

$$\frac{d}{dt}(m_{\text{gas}} + m_{\text{liquid}} + m_{\text{solid}}) = 0. \quad (8)$$

На внутренней поверхности оболочки при $r = R_0$ наряду с непрерывностью температуры следует потребовать и непрерывность потока тепла:

$$\left[k_1 \frac{\partial T_1}{\partial r} \right]_{r=R_0} = \left[k_{\text{sh}} \frac{\partial T_{\text{sh}}}{\partial r} \right]_{r=R_0}, \quad (9)$$

поскольку здесь тепло никуда не тратится. Индекс 1 в (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:

$$[\partial T / \partial r]_{r=0} = 0. \quad (10)$$

Граничное же условие на внешней поверхности оболочки при $r = R = R_0 + \Delta R$ 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 $T_{\text{external}}(t)$, то

$$T_{\text{sh}}(r = R) = T_{\text{external}}(t). \quad (11)$$

Если мишень окружена вакуумом и охлаждается лишь за счёт излучения с её поверхности, то

$$\left[4\pi r^2 k_{\text{sh}} \frac{\partial T_{\text{sh}}}{\partial r} + \sigma(T) T_{\text{sh}}^4 \right]_{r=R} = 0. \quad (12)$$

Если на внешней поверхности оболочки задан поток тепла q , то

$$\left[4\pi r^2 k_{sh} \frac{\partial T_{sh}}{\partial r} \right]_{r=R} = -q. \quad (13)$$

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

$$[T_{sh}]_{r=R} = (1 - \chi)[T_{sh}]_{r=R_0} + \chi T_{external}. \quad (14)$$

Уравнения (1)—(9) с граничными условиями (10)—(14) представляют собой задачу Стефана для случая вымораживания топливного слоя внутри полой сферической оболочки, причём способ отвода тепла из мишени может варьироваться в соответствии с условиями эксперимента за счёт изменения внешнего граничного условия [19—21].

Как отмечалось, решения описанной задачи можно ранжировать по характерному времени главных процессов — теплопереноса внутри мишени и темпа отвода тепла с поверхности мишени $\tau_{surface}$. 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. Для анализа полученных результатов удобно использовать следующие параметры протекающих процессов:

— 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;

— время τ_1 , τ_2 , τ_3 , τ_4 суть время 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, τ_3 — момент времени, когда начинается затвердение, τ_4 — момент времени, когда всё превратилось в лёд.

Быстрый отбор тепла. Метод FIF. Далее мы обсудим результаты для случая быстрого отбора тепла, когда вся мишень целиком погружена в жидкий гелий. Если не оговорено иначе, то исходные данные для расчёта 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 мс;

— оболочка сделана или из стекла, или из полистирола, заполняется либо водородом H_2 ($\rho_{fill} = 25$ мг/см³), либо дейтерием D_2 ($\rho_{fill} = 50$ мг/см³);

— данные для расчёта взяты из работ [61—65].

Результаты для оболочки из стекла представлены в табл. 5. При их анализе будем следить за характерным временем существования жидкой фазы $\tau_3 - \tau_1 = \tau_{liquid}$. Сразу отметим, что для дейтерия величина τ_{liquid} уже составляет ~ 10 мс (т.е. сравнима с $\tau_{gravity} \sim 10$ мс).

Т а б л и ц а 5. Результаты расчёта для мишени с оболочкой из стекла (марка пирекс)

Газ	τ_1	τ_2	τ_3	τ_4
H_2	4,3	8,53	8,53	13,7
D_2	5,74	7,99	13,29	16,3

Примечание: $\tau_{surface} = 1$ мс, $\Delta R = 10$ мкм.

Результаты для оболочки из полистирола представлены в табл. 6. Теплопроводность полистирола значительно меньше, чем у стекла, и мы вправе ожидать увеличения характерного времени. Это подтверждается и на счёте. Из табл. 6 видно, что теперь даже величина $\tau_2 - \tau_1$ существенно превышает 10 мс как для водорода, так и для дейтерия. Очевидно, что увеличение толщины оболочки или величины $\tau_{surface}$

Т а б л и ц а 6. Результаты расчёта для мишени с оболочкой из полистирола

Газ	τ_1	τ_2
H_2	95,62	168,2
D_2	124,57	227,6

Примечание: $\tau_{surface} = 1$ мс, $\Delta R = 10$ мкм

приведёт лишь к увеличению времени существования жидкой фазы. Соответствующие результаты отражены в табл. 7 и 8.

Т а б л и ц а 7. Результаты расчёта для мишени с оболочкой из стекла (пирекс) при вариации толщины оболочки и времени спада температуры на её внешней поверхности

τ_{surface}	τ_1	τ_2	τ_3	τ_4
$\text{H}_2, \Delta R = 15 \text{ мкм}$				
1,0	5,83	10,74	15,59	18,71
10,0	25,93	35,81	42,23	47,07
$\text{H}_2, \Delta R = 25 \text{ мкм}$				
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

Т а б л и ц а 8. Результаты расчёта для мишени с оболочкой из полистирола при вариации толщины оболочки

$\Delta R, \text{ мкм}$	τ_1	τ_2	τ_3	τ_4
1,0	7,99	16,90	30,13	38,04
1,5	11,39	24,00	44,20	54,89
2,0	15,04	31,17	58,47	71,88
3,0	23,01	45,89	87,86	106,57
5,0	41,67	77,87	150,22	179,19
10,0	95,62	16,2	327,86	382,47
15,0	189,31	293,89	538,04	617,96

Примечание: $\text{H}_2, \tau_{\text{surface}} = 1 \text{ мс}$.

Рис. 8. Оболочки с жидким водородом

При анализе результатов расчёта обращает внимание на себя тот факт, что характерное время существования жидкой фазы τ_{liquid} (как для водорода, так и для дейтерия) в интересующем нас случае оболочки из полистирола более 10 мс ($\Delta R = 10 \text{ мкм}$), а для более толстых оболочек превышает 100 мс. За это время жидкость в поле обычной силы тяжести неминуемо стечёт на дно мишени. Напомним, что время стекания для мишени $\varnothing \sim 1 \text{ мм}$ составляет $\tau_{\text{gravity}} \sim 10 \text{ мс}$. Для иллюстрации на рис. 8 показан конечный результат такого процесса — жидкая фаза водородного топлива на дне полимерных оболочек. Условия эксперимента: использовались оболочки из полистирола $\varnothing \sim 1 \text{ мм}$, толщина стенки оболочки составляла 10 мкм, диффузионное заполнение газообразным водородом осуществлялось при комнатной температуре до

давления 445 атм.

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 КФ (метод FST) позволяет эффективно противодействовать стеканию топлива, давая возможность топливному слою равномерно затвердеть.

Умеренный отбор тепла. Метод FST. Как мы уже отмечали, умеренный отбор тепла реализуется, когда лишь часть поверхности мишени при её движении в канале формирования находится в тепловом контакте с окружающей средой. Прижимаясь к холодной стенке канала, оболочка слегка деформируется, и образуется контактное пятно S_{ca} (см. рис. 5, в), которое будем характеризовать следующим соотношением: $S_{\text{ca}} = \chi S_{\text{sh}}$, 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 $\chi_{\text{эф}} = \text{геометрическое } (\chi_g) + \text{тепловое } (\chi_t)$ [19—21, 25, 44]. При этом существуют особенности, которые необходимо учитывать при моделировании процесса остывания мишени. Так, при качении мише-

ни по криволинейному каналу происходит увеличение геометрического пятна контакта за счёт кривизны спиральной трубки. Увеличение пятна контакта связано ещё и с тепловыми эффектами, когда пятно контакта как бы «расплывается», так как передача тепла идёт 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 её толщина значительно меняется в зависимости от дизайна мишени. Это связано с тем, что изменение формы оболочки имеет сложный характер, так как деформируется не только её 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. Полученные результаты детально представлены в обзорной работе [44]. Показано, что пятна контакта размером порядка $\chi_g \geq 10^{-4}$ вполне могут образовываться в условиях FST-эксперимента. В работе [44] также получена оценка величины $\chi_{эф}$ при решении задачи о тангенциальном распространении тепла через распределённые источники, которые соответствуют радиальному тепловому потоку. Показано, что в условиях FST-эксперимента образуются эффективные пятна контакта (геометрическое + тепловое) размером $\chi_{эф} \geq 10^{-3}$ (табл. 9), что на порядок больше χ_g (табл. 10). Убедимся, что при этих условиях время формирования криогенного слоя не превысит 10 с. Для этого проанализируем эксперименты по FST-формированию слоя внутри цилиндрического и спирального КФ.

Таблица 9. Сравнение экспериментальных и теоретических результатов для цилиндрического и спирального каналов формирования

№	Изотоп	$2R$, мкм	Тип геометрии канала	T_{in} , К	W , мкм	$\langle \chi_{эф} \rangle$	τ_{liquid} , с	τ_{form} , с	τ_{res} , с
1	H ₂	983	Цилиндр	21	88	$2,40 \cdot 10^{-3}$	2,97	7,22	8
2	H ₂	983	Цилиндр	15	88	$2,40 \cdot 10^{-3}$	0,97	5,13	8
3	D ₂	980	Спираль	26	30	$2,59 \cdot 10^{-3}$	1,95	3,74	12

Примечание: для цилиндрического канала были проведены две серии экспериментов: № 1 — $T_{in} = 21$ К и № 2 — $T_{in} = 15$ К для исследования вопросов симметризации слоя.

Таблица 10. Параметры оболочек из полистирола

№	R	ΔR	R_0	R_{ca}	χ_g
1 и 2	491,5	15	476,5	11,76	$1,43 \cdot 10^{-4}$
3	490,0	15	475,0	11,39	$1,35 \cdot 10^{-4}$

Примечание: размерные величины даны в микронах.

Результаты расчётов и соответствующие экспериментальные данные отражены в табл. 9, в которой приняты следующие обозначения: T_{in} — начальная температура мишени перед её инъекцией в канал формирования; W — толщина криогенного слоя топлива; τ_{res} — время пребывания мишени в канале формирования (эксперимент); τ_{liquid} — характерное время существования жидкой фазы в процессе охлаждения мишени (расчёт); τ_{form} — полное время формирования слоя (расчёт). Подчеркнём, что всегда должно выполняться очевидное условие $\tau_{form} \leq \tau_{res}$.

Время формирования мишеней рассчитывалось согласно числительному коду Rapid FST (быстрое FST-формирование), разработанному в ФИАН [21]. Параметры оболочек и топлива представлены соответственно в табл. 10 и 11. В табл. 10 R_{ca} — радиус геометрического пятна контакта, параметр χ_g определяется следующим соотношением [44]:

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

где G — сила нормальной реакции опоры при качении оболочки по КФ; E — модуль Юнга для материала оболочки; δ — обратное аспектное отношение оболочки.

Таблица 11. Параметры распределения топлива в мишени

№	Изотоп	V_{cl}	m_{cl}	V_v	m_v	ρ_f	P_f	M_f
1 и 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

В табл. 11 для распределения топлива в мишени при температуре тройной точки $T_{тр}$ приняты следующие обозначения: V_{cl} (мм³) и m_{cl} (мкг) — объём и масса твёрдого слоя; V_v (мм³) и m_v (мкг) — объём и масса пара в полости мишени; M_f (мкг) — полная масса топлива в мишени. В таблице также указаны величины ρ_f (мг/см³) и P_f (атм.) — исходные плотность и давление газообразного топлива при 300 К, обеспечивающие наблюдаемую конфигурацию топлива при $T_{тр}$.

Анализируя данные табл. 9, прежде всего отметим, что теоретические результаты, полученные в рамках созданной модели, находятся в хорошем согласии с экспериментально наблюдаемым временем пребывания мишени в КФ τ_{res} . Два последних столбца таблицы с очевидностью демонстрируют возможности метода FST за короткое время сформировать внутри полимерной оболочки криогенный слой значительной толщины, причём расчётное время формирования слоя удовлетворяет условию $\tau_{form} \leq \tau_{res}$.

Теперь перейдём к рассмотрению вопроса о симметризации криогенного слоя, для чего детально опишем схему постановки экспериментов, представленных в табл. 9.

Эксперимент № 1. Начальная температура мишени перед её инжекцией в КФ $T_{in} = 21$ К (температура начала вымораживания слоя для H_2 равна $T_{тр} = 13,96$ К). Согласно фазовой диаграмме (см. рис. 7) топливо находится частично в жидком и частично в газообразном состоянии, т.е. неоднородность слоя по толщине составляет 100% (конфигурация стёкшей жидкости внутри оболочки — «жидкость + пар» (рис. 9, а)). Характерное время существования жидкой фазы в процессе охлаждения мишени $\tau_{liquid} = 2,97$ с (см. табл. 9). Равномерный слой толщиной $W = 88$ мкм сформирован методом FST при температуре 5,5 К (рис. 9, б) за время $\tau_{form} = 7,22$ с (см. табл. 9).

Эксперимент № 2. При понижении начальной температуры T_{in} с 21 (рис. 10, а) до 15 К (рис. 10, б) симметризирующий эффект пропадает. В рамках нашей модели можно предложить следующее объяснение

Рис. 9. Метод FST обеспечивает быстрое формирование и симметризацию конденсированных слоёв топлива: а — мишень до начала формирования при $T_{in} = 21$ К, диаметр оболочки $\varnothing = 986$ мкм, начальное состояние водорода — «жидкость + пар» ($T_{in} < T_{кр} = 33,19$ К) с максимальной асимметрией слоя $NU = 100\%$; б — мишень после формирования при $T = 5,5$ К

Рис. 10. Влияние начальной температуры мишени на симметризацию слоя

исчезновения симметризации слоя при снижении T_{in} практически до температуры тройной точки для водорода (13,96 К). Твёрдый криогенный слой образуется внутри оболочки, непременно проходя через жидкую фазу. Ранее было показано, что даже в случае высоких скоростей охлаждения время существования жидкой фазы существенно превышает время гравитационного стекания топлива $\tau_{gravity}$. Это означает, что при использовании, например, неподвижной мишени жидкое топливо всегда замерзнет в виде асимметричного слоя льда. Использование движущейся мишени (метод FST, см. рис. 10, а) позволяет избежать трудностей, присущих формированию твёрдого топлива в неподвижной мишени. Но при этом должно быть выполнено следующее условие: время существования жидкой фазы τ_{liquid} должно превышать время τ_{sym} , характеризующее растекание жидкого топлива по оболочке для достижения требуемого

уровня симметрии слоя. Величина τ_{sym} определяется исходными параметрами мишени и характером её движения в КФ. Поэтому имеет смысл задача об оптимальной с той или иной точки зрения форме (геометрии) канала при заданных технологических ограничениях.

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. 10, б хорошо видно, что при движении мишени жидкий водород лишь только начал растекаться по внутренней поверхности оболочки. И поскольку начальная температура мишени $T_{\text{in}} = 15$ К достаточно близка к температуре вымораживания для H_2 ($T_{\text{tp}} = 13,96$ К), то формирование твёрдого слоя началось ещё до момента достижения требуемой симметризации жидкого слоя. Таким образом, время τ_{liquid} — ключевой параметр, оно должно быть достаточным для экспериментальной реализации полной симметрии слоя.

Эксперимент № 3. Начальная температура мишени перед её инъекцией в спиральный канал формирования равна 26 К (температура начала вымораживания для D_2 равна $T_{\text{tp}} = 18,7$ 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 $\tau_{\text{liquid}} = 1,95$ с. Симметричный слой толщиной 30 мкм (в ~3 раза меньше, чем в экспериментах № 1 и № 2) был сформирован при температуре 5,5 К за время $\tau_{\text{form}} = 3,74$ с (см. табл. 9). Мы получили закономерный результат: меньший по толщине слой требует и меньшего времени для его выравнивания относительно внутренней поверхности движущейся оболочки.

Сделаем ещё несколько замечаний относительно механизма динамической симметризации жидкого слоя в движущейся оболочке. При качении оболочки вдоль КФ симметризация жидкого слоя топлива может наступить только при условии непостоянства оси вращения. Если ось вращения постоянна, то ни о какой сферической симметризации слоя 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 «среднего» (во времени и пространстве) компонента.

То, что поведение оси вращения оболочки оказывает существенное влияние на процесс симметризации слоя жидкости, хорошо видно из экспериментов, представленных на рис. 11. Эти модельные эксперименты [30] выполнены с целью визуального подтверждения сказанного: симметризация жидкого слоя топлива может наступить только при условии непостоянства оси вращения — так называемая мишень со свободно вращающейся осью (см. рис. 11, в). Если ось вращения постоянна, то можно рассчитывать на достижение лишь осевой симметрии слоя (см. рис. 11, а, б).

Рис. 11. Вымораживание водорода H_2 и дейтерия D_2 внутри полимерных СН-оболочек: а, б — ось вращения неизменна; в — мишень со свободно вращающейся осью. Эксперименты выполнены с использованием R&B-ячейки (Rotating and Bouncing cell) [30]

Моделирование механизма динамической симметризации жидкого топлива выполнено в работах [19—21] для мишеней с диаметром $\varnothing \leq 1$ мм и простого спирального канала формирования. Для мише-

ней 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 счёт её движения по траектории сложной геометрии [44, 45].

Подчеркнём, что даже простой переход от цилиндрического канала к спиральному (см. табл. 9) уже даёт технологические преимущества: во-первых, значительно увеличивается время пребывания мишени в канале формирования (спираль — 12 с, цилиндрическая геометрия — 8 с), во-вторых, спиральный канал имеет больший набор управляющих параметров для достижения требуемой симметрии слоя. К ним относятся профиль температуры вдоль КФ, который позволяет увеличить время τ_{liquid} , геометрия спирального КФ (угол захода, диаметр и высота спирали), а также тип самой спирали.

Отметим, что при формировании криогенных мишеней требования на симметрию слоя всегда были достаточно жёсткими. Современные представления по этому вопросу и детальные обоснования спецификаций даны в работе [64]: отклонения ε_1 от сферичности и концентричности должны составлять не более 1%, локальные неоднородности на поверхности топливного слоя ε_2 (шероховатость или гладкость слоя) не должны превышать 1 мкм.

Первый пункт мы уже обсудили (параметр ε_1) при рассмотрении вопроса о механизме динамической симметризации жидкого топлива. Остаётся ещё один вопрос, связанный с достижением требуемой шероховатости слоя (параметр ε_2), который требует специального комментария. Этот вопрос напрямую связан с влиянием микроструктуры твёрдого 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 топливного конденсата. Далее дана характеристика основных результатов по формированию слоя, полученных в ведущих лабораториях мира.

Медленное охлаждение: США (установки NIF и OMEGA), а также Франция (установка LMG) [64].

Традиционные методы формирования позволяют получить криогенный слой типа «монокристалл» с гладкой внутренней поверхностью при реализации очень медленного теплоотвода от поверхности мишени (скорость охлаждения $\sim 3 \cdot 10^{-5}$ К/с, время формирования от 5 до 24 ч) в максимально однородном температурном поле (вариации по температуре составляют ~ 1 мК).

Результаты эксперимента: получаемые слои крайне чувствительны (неустойчивы) к внешним тепловым и механическим воздействиям [64]: «If the temperature of the layered target decreases by more than a few degrees, then internal stresses may cause damage due to cracking at interfaces. If the temperature increases by more than a few degrees, then weakening of the DT ice may cause unacceptable deformations».

Скоростное охлаждение: ФИАН (Россия, обзор [46]).

Методом десублимации топлива (скорость охлаждения > 100 К/с) на глубоко охлаждённой стенке мишени формируется гладкий стеклообразный топливный слой (рис. 12).

Рис. 12. Вариации скорости охлаждения приводят к формированию криогенных слоёв водорода с различной степенью структурирования. В данных экспериментах какие-либо добавки к топливу не использовались. В этом случае прозрачные криогенные слои получаются только при сверхвысоких скоростях охлаждения (> 100 К/с)

Результаты эксперимента: малая толщина слоя — не более 10 мкм. Напомним, что для формирования мишеней реакторного класса (например, мишеней класса CHGT-1) необходимо сформировать криогенный слой толщиной $W = 200$ мкм [53].

Умеренные скорости охлаждения: ФИАН (Россия) [46].

Методом FST (скорость охлаждения 1—50 К/с, время формирования <15 с) получен термостойкий изотропный ультрадисперсный слой с требуемой гладкостью внутренней поверхности слоя (рис. 13 и 14).

Рис. 13. Формирование и стабилизация ультрадисперсной структуры криогенного слоя

Рис. 14. Результаты FST-формирования слоя при использовании добавок к топливу (20%): а — оболочка из стекла; б — полимерная оболочка; в — результат характеристики криогенного слоя для мишени на рисунке (б), полученный с помощью 100-проекционного видеотомографа [29]

Результаты эксперимента: метод перспективен для развития реакторных технологий формирования слоя и может служить основой для построения фабрики мишеней.

Закономерно встаёт вопрос, почему же в экспериментах (см. рис. 9 и 10) полученные по методу FST структуры явно относятся к крупнокристаллической фазе, не обладающей требуемым уровнем гладкости внутренней поверхности криогенного слоя. Это связано с тем, что первоначально мы использовали только чистые изотопы водорода (см. рис. 12), поскольку основные усилия были направлены на получение сферически симметричных криогенных слоёв топлива.

В последующих исследованиях условия проведения экспериментов были изменены. Высокие скорости охлаждения сочетались с применением высокоплавких добавок к топливу (комбинированный метод FST). Это позволило быстро (<15 с) сформировать устойчивый изотропный твёрдый слой в ультрадисперсном состоянии (см. рис. 13 и 14). На рис. 13 показано: рис. 13, а — водород (кадр 1 — H_2 без примесей, кадр 2 — $H_2 + 5\%HD$); рис. 13, б — дейтерий (кадр 3 — D_2 без примесей, кадр 4 — $D_2 + 3\%Ne$). Влияние добавок с очевидностью демонстрируют чётные кадры эксперимента — это формирование прозрачного криогенного слоя. Томография слоя показала, что локальные неоднородности на его внутренней поверхности $\varepsilon_2 = 0,15$ мкм (см. рис. 14, в), что удовлетворяет жёстким нормативным требованиям, а именно: величина ε_2 не должна превышать 1 мкм.

Что касается роли добавок, мы лишь кратко остановимся на двух аспектах, важных для последующего изложения (более подробно см. обзорную работу [2]).

По влиянию на структуру ближнего порядка силы взаимодействия можно подразделить на два вида: направленные и ненаправленные. Твёрдые изотопы водорода относятся к веществам с ненаправленной связью. Для таких веществ применение добавок позволяет существенно снизить скорость охлаждения, требуемую для формирования ультрадисперсных слоёв, и повысить устойчивость (термостойкость) слоя, поскольку высокоплавкие добавки к топливу тормозят диффузионные процессы в веществе, по-

вышая энергию активации диффузии, а также обеспечивают условия для инициации и массового роста дислокаций, препятствующих образованию крупнокристаллической фазы. По существу, легирующие добавки к топливу обеспечивают получение новых функциональных материалов.

Наличие добавок позволяет перейти к реализации условий, отвечающих практическому созданию новой технологии. Это связано с тем, что формирование прозрачных криогенных слоёв требуемого качества без использования добавок к топливу возможно лишь при достижении очень высоких скоростей охлаждения ($q > 100$ К/с, см. рис. 12), а также при соблюдении специальных условий эксперимента. Для создания надёжной и дешёвой технологии поточного (или конвейерного) производства мишеней необходимо снизить скорости охлаждения на полтора—два порядка. Именно это и позволяют сделать легирующие высокоплавкие добавки к топливу. 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 неона (Ne от 3 до 20%), который моделирует тритий в наших экспериментах, и получили желаемый результат (см. рис. 13, б (кадр 4) и рис. 14, а, б). Цель этих экспериментов — показать перспективность метода FST при работе с DT-смесью в стандартной эквимольной композиции, а также с пониженным содержанием трития в смеси.

Еще один важный момент — это выживаемость криогенных топливных слоёв в процессе доставки мишени в лазерный фокус. Процесс доставки включает в себя стадию ускорения и стадию полёта мишени внутри камеры. Принципиально не устранимыми источниками механического и теплового разрушения мишени на этих стадиях являются перегрузки при ускорении и теплопритоки от излучения стенок камеры и горячего остаточного газа.

Снижение скорости инжекции мишени в камеру реактора позволяет уменьшить перегрузки и тем самым снизить вероятность механического разрушения мишени. Однако, чем меньше скорость инжекции, тем дольше мишень находится под воздействием температурных перегрузок, угрожающих тепловому разрушению криогенного слоя, т.е. росту его шероховатости (высокие моды возмущений) и разнотолщинности (низкие моды возмущений) сверх допустимых норм. Поэтому, чтобы доставить мишень без разрушения, необходимо провести детальное исследование, предметом которого является эффект деградации топливного слоя с различной внутренней структурой под воздействием теплового излучения стенок реакторной камеры, внутри которой движется мишень.

Выживаемость криогенных водородных слоёв топлива, подверженных внешнему воздействию, зависит от структуры слоя. При рассмотрении данного вопроса мы руководствовались тем фактом, что в равновесном состоянии твёрдые изотопы водорода состоят из анизотропных молекулярных кристаллов. В работе [57] обнаружено, что анизотропия в величине скорости звука присуща ГПУ-решётке изотопов водорода (ГПУ — гексагональная плотная упаковка) и для H_2 и D_2 составляет около 20% (продольный звук) и 33% (поперечный звук). Поскольку в соответствии с теорией Дебая решёточная теплопроводность прямо пропорциональна величине скорости звука, то 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. 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.

В работах [35, 36] выполнено численное моделирование процесса деградации топливного слоя при нагревании криогенной мишени в камере реактора с тёплыми стенками для двух интересующих нас случаев:

— изотропный ультрадисперсный слой. Скорости охлаждения, свойственные методу FST (1—50 К/с), способствуют образованию чрезвычайно разупорядоченных структур с большой плотностью дефектов, т.е. образованию изотропной среды. В изотропном слое коэффициент теплопроводности k_s не зависит от пространственных координат;

— анизотропные молекулярные кристаллы (реальный монокристалл или поликристаллы с крупными кристаллическими зёрнами, скорость охлаждения $\sim 3 \cdot 10^{-5}$ К/с). Получение топливного слоя в анизотропном кристаллическом состоянии характерно для традиционных методов производства криогенных

мишеней. В этом случае коэффициент теплопроводности слоя зависит от пространственных координат, а эксперименты по сжатию таких мишеней подтверждают высокую чувствительность анизотропного топлива к внешним тепловым воздействиям на мишень [64]. Теперь попробуем проследить тепловую историю мишени с различной степенью анизотропии слоя при её полёте в камере реактора с тёплыми стенками.

В системе сферических координат r, θ, φ коэффициент теплопроводности для анизотропного слоя может быть записан в следующем виде:

$$k_1 = k_s(1 + \xi_1(\varphi, \theta)); k_2 = k_s(1 + \xi_2(\varphi, \theta)); k_3 = k_s(1 + \xi_3(\varphi, \theta)),$$

где $\xi_{1, 2, 3}$ представляет собой безразмерную функцию, описывающую зависимость коэффициента теплопроводности от направления. Далее воспользуемся результатами исследований [35, 36], выполненных для мишени реакторного класса CHGT-1 ($\varnothing = 4$ мм, $\Delta R = 45$ мкм, $W = 200$ мкм) [53]. На мишень падает однородный тепловой поток излучения от стенок камеры реактора SOMBRERO с температурой 1758 К [54]. Тепловой поток, поглощённый в материале мишени J , составляет от 5,0 до 0,5 Вт/см², температура мишени при её инжекции варьировалась в пределах $T = 10\text{—}18$ К. Полученные результаты численного моделирования позволяют оценить время жизни топливного ядра (т.е. время до момента нарастания шероховатости слоя сверх допустимого значения, которое определяется соотношением $\varepsilon_2 < 1$ мкм) и, как следствие, определить условия сохранения качества мишени в процессе её инжекции в реакторную камеру.

Данные, представленные в табл. 12, обнаруживают следующую закономерность: скорость роста шероховатости слоя тем меньше, чем ниже уровень анизотропии слоя. Для более детального анализа отметим, что минимальное время полёта 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/с). Это время составляет примерно 16 мс. Если время роста Δt_{rough} шероховатости слоя сверх допустимого значения (параметр ε_2) меньше минимального времени инжекции ($\Delta t_{cc} = 16$ мс), то даже идеально сформированная мишень в процессе её полёта в камере реактора теряет своё качество и становится непригодной для сжатия по схеме ИТС.

Т а б л и ц а 12. Δt_{rough} , мс, как функция ξ при различных величинах поглощённого потока

$\xi, \%$	$J = 5 \text{ Вт/см}^2$		$J = 0,5 \text{ Вт/см}^2$	
	D ₂	DT	D ₂	DT
1	11,7	9,8		
3	6,4	5,4	15,4	13,0
5	4,7	4,0	11,5	9,7
10	3,0	2,6	7,6	6,5
15	2,4	2,0	6,1	5,1
20	2,0	1,7	5,1	4,4

Примечание: температура инжекции $T = 10$ К.

Анализ табл. 13 позволяет сделать следующие заключения:

— криогенный слой с анизотропией $\xi \geq 10\%$ даже при относительно низком уровне поглощённого тепла $J = 0,5 \text{ Вт/см}^2$ деградирует вследствие роста его шероховатости ещё до момента прихода инжектированной мишени в центр реакторной камеры (даже при максимальной скорости инжекции 400 м/с);

— для анизотропного слоя при $\xi = 7\text{—}9\%$ остаётся единственная возможность — инжекция мишени при температуре $T = 18$ К. Однако при этом величина T становится близкой к температуре $T_{cc} = 18,5$ К, при которой мишень с твёрдым DT-слоем должна достичь центра реакторной камеры. Другими словами,

Т а б л и ц а 13. Δt_{rough} , мс, как функция ξ при различных величинах температуры инжекции

$\xi, \%$	DT-топливо				
	Температура инжекции				
	10 К	12 К	14 К	16 К	18 К
7	8,3	10,5	12,9	16,2	21,0
8	7,7	9,7	11,9	15,0	19,5
9	7,2	9,1	11,1	14,0	18,3
10	6,8	8,6	10,5	13,3	17,3
20	4,6	5,8	7,1	9,0	11,9

Примечание: $J = 0,5 \text{ Вт/см}^2$.

это означает, что мишень должна инжектироваться в камеру со скоростью ~ 400 м/с. При этом габариты инжектора должны быть значительно увеличены за счёт увеличения длины ускорения, ибо в противном случае мишень будет разрушена под действием значительных механических перегрузок. Для справки: на стадии ускорения в инжекторе перегрузки возникают за счёт превышения ускорения мишени a над ускорением свободного падения g и могут достигать $\sim 1000 g$ [51].

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 ещё более сложной.

Таким образом, формирование изотропных ультрадисперсных криогенных слоёв является не только условием получения качественного топлива, но и условием сохранения этого качества вплоть до момента облучения мишени. Изотропные ультрадисперсные слои можно отнести к классу слоёв, обладающих свойством самосохранения, имея в виду их высокую механическую и тепловую устойчивость. Это является важным фактором с точки зрения сохранения качества слоя при ускорении и инжекции готовой мишени.

Подводя итог теоретических и экспериментальных исследований, выполненных в ФИАН по программе FST-формирования криогенных мишеней с ультрадисперсной структурой топлива, подчеркнём следующие важные аспекты, касающиеся метода FST:

- результаты, полученные в рамках созданной базовой модели, находятся в хорошем согласии с экспериментально наблюдаемым временем FST-формирования слоя и уровнем его симметризации. Поэтому естественно считать, что именно механизм контактной теплопроводности и механизм динамической симметризации топлива реализуются на практике [25];

- высокие скорости охлаждения ($1\text{—}50$ К/с) при использовании высокоплавких добавок к топливу позволили быстро (менее чем за 15 с) сформировать с помощью метода FST устойчивый изотропный твёрдый слой в ультрадисперсном состоянии. Речь идёт о получении новых функциональных структур топливного слоя, обладающих долгоживущими характеристиками качества. Это имеет первостепенное значение для практической реализации требований по физике сжатия мишеней, а также сохранения качества топливного слоя при доставке готовых мишеней в камеру реактора ИТС [46];

- метод FST впервые даёт возможность статистически изучать процесс формирования слоя [12]. Количество мишеней за один эксперимент здесь может достигать 10—15 штук (в традиционном подходе изучается только одна мишень). Все это экономит время, повышает надёжность получаемых результатов, а также существенно снижает расходы на проведение экспериментов;

- разработан численный код Rapid FST [19—21] и соответствующий пакет прикладных программ для прогнозирования и анализа экспериментальных результатов по производству криогенных мишеней методом FST. Код Rapid FST позволяет детально исследовать одну из ключевых проблем — оптимизацию работы МФ, включая упрощение конструкции и внесение поправок в спецификации. Интересным предложением является комбинированный КФ с переменным углом захода спирали α . Конструктивно он состоит из двух спиралей — спирали ускорения ($\alpha > 0$) и спирали торможения ($\alpha \sim 0$), чтобы снизить скорость мишени на выходе из КФ и исключить риск её разрушения при инжекции в ТК [40];

- таким образом, FST-подход, основанный на работе с движущимися бесподвесными мишенями, по сути, является принципиально новой альтернативой существующим технологиям, так как позволяет формировать криогенные мишени требуемого качества и в заданном частотном режиме (рис. 15). Практическим воплощением данной инновационной технологии станет разработка прототипа фабрики мишеней для мощных лазерных установок и реактора ИТС.

Рис. 15. Криогенные мишени для прямого облучения, сформированные методом FST, который основан на работе с движущимися бесподвесными мишенями (производство ФИАН): *а* — механизм динамической симметризации топлива; *б* — готовая мишень; *в* — инъекция мишеней

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Структурно-чувствительные методы и метод FST. В работе [66] дано очень точное и вместе с тем наглядное определение того, что есть вещество и материал и какова роль структурно-чувствительных методов при получении новых функциональных материалов:

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

Материал = [состав вещества (А) + агрегатное состояние (А) + аллотропная модификация (А)] + [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 нём 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 может быть заменена более общим понятием «фаза», то предыдущее определение преобразуется в более общее и, на первый взгляд, более простое:

Материал = Фаза(ы) + Микроструктура.

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 как раз и относится к структурно-чувствительным методам, цель которого заключается именно в том, чтобы сформировать оптимальную микроструктуру твёрдого топлива применительно к задачам ИТС. Высокие скорости охлаждения при реализации метода FST и использование легирующих добавок к топливу позволяют получать предельно разупорядоченные структуры с большой плотностью дефектов, т.е. изотропную среду (или так называемые ультрадисперсные слои). Такие слои относятся к классу слоёв, обладающих повышенной механической и тепловой устойчивостью, что минимизирует риск потери качества слоя в процессе доставки мишени в реакторную камеру, а также на этапе сжатия мишени при прохождении по слою первой ударной волны [35, 36, 44, 46]. По сути, работы [44—46] посвящены обзору результатов, полученных авторами именно в этой области. В них также обсуждаются технологически элегантные решения, основанные на методе FST, с целью показать надёжный путь для

создания массового поточного производства криогенных топливных мишеней для дальнейшего развития исследований по программе ИТС.

Подчеркнём, что метод FST, разработанный в ФИАН, является уникальным и не имеет аналогов в мире. Данный метод и оборудование, обеспечивающее его реализацию, защищены тремя авторскими свидетельствами и патентом Российской Федерации [4—6, 23]. Дальнейшее развитие технологий на основе метода FST осуществляется в рамках программы по созданию модульного варианта фабрики мишеней реакторного класса и коммерциализации полученных результатов [1—3, 42—47, 67—70]. Поэтому в следующей части данной работы «Криогенное водородное топливо для управляемого инерциального термоядерного синтеза» мы более детально рассмотрим особенности FST-формирования криогенных мишеней прямого сжатия, начиная от дизайна мишеней для установки OMEGA до мишеней реакторного класса.

БЛАГОДАРНОСТИ

В исследованиях использовались сферические оболочки из стекла, лавсана и полистирола (с покрытиями и без покрытий, диапазон диаметра от 200 мкм до 1,8 мм), созданные под руководством профессора Ю.А. Меркульева и при участии коллектива Лаборатории термоядерных мишеней (ФИАН).

REFERENCES

1. Aleksandrova I.V., Koresheva E.R., Krokhin O.N., Osipov I.E. Cryogenic hydrogen fuel for controlled inertial confinement fusion (review of world results). — VANT. Ser. Termoyadernyi sintez (Problems of Atomic Science and Technology. Ser. Thermonuclear Fusion), 2015, vol. 38, issue 1, p. 57 (in Russian).
2. Aleksandrova I.V., Koresheva E.R., Krokhin O.N., Osipov I.E. Cryogenic hydrogen fuel for controlled inertial fusion energy (manufacture of stable superdispersed layer of solid hydrogen isotopes). — VANT. Ser. Termoyadernyi sintez (Problems of Atomic Science and Technology. Ser. Thermonuclear Fusion), 2015, vol. 32, issue 2, p. 75 (in Russian).
3. Koresheva E.R., Aleksandrova I.V., Koshelev E.L. et al. Conception of a cryogenic target factory for IFE reactor. — In: 25th IAEA Fusion Energy Conf. St. Petersburg, RF, 13—18 October, 2014.
4. Baranov G.D., Koresheva E.R., Listratov V.I. et al. Device for thermonuclear fuel elements injection into fusion reactor. Athor certificate № 1586437, tender № 4379549 of 11 January 1988, registered in the USSR State register of inventions, 15 April 1990 (in Russian).
5. Koresheva E.R., Osipov I.E. Laser thermonuclear installation. Athor certificate № 1586437, tender № 4843163 of 27 June 1990, registered in the USSR State register of inventions, 1 April 1992 (in Russian).
6. Koresheva E.R., Osipov I.E. Device for forming and injection of cryogenic fuel targets of laser thermonuclear installation. Athor certificate № 1820757, tender № 4925861 of 5 April 1991, registered in the USSR State register of inventions, 12 October 1992 (in Russian).
7. Aleksandrova I.V., Koresheva E.R., Osipov I.E. Changes in the morphology of frozen hydrogen-isotope layers under target heating. — J. Moscow Physics Soc., 1993, vol. 3, p. 85.
8. Aleksandrova I.V., Koresheva E.R., Osipov I.E. ICF Cryotargets: science and technology. — Ibid., 1994, vol. 4, № 2, p. 81.
9. Aleksandrova I.V., Danilov A.E., Orlov V.V., Fedotov S.I. The effect of laser radiation coherence degree on implosion results in ICF research. — Ibid., vol. 4, № 2, p. 129.
10. Aleksandrova I.V., Fedotov S.I. A scope for beam smoothing relying on a special target design. — Ibid., vol. 4, № 2, p. 141.
11. Aleksandrova I.V., Koresheva E.R., Krokhin O.N., Osipov I.E. Rapid low temperature technique for cryogenic solid layering. — Ibid., 1997, vol. 2, p. 145.
12. Aleksandrova I.V., Koresheva E.R., Krokhin O.N., Osipov I.E. Statistical investigations of cryogenic target formation and future trends of development. — Ibid., 1999, vol. 9, p. 311.
13. Aleksandrova I.V., Belolipetskiy A.A. An efficient method for filling targets with a highly-pressurized gas fuel. Mathematical model for single- and multilayered target. — Ibid., p. 325.
14. Aleksandrova I.V., Belolipetskiy A.A. Mathematical models for filling polymer shells with a real gas fuel. — Laser and Particle Beams, 1999, vol. 17, № 4, p. 701.
15. Aleksandrova I.V., Koresheva E.R., Osipov I.E., Panina L.V. Cryotargets for modern ICF experiments. — Ibid., 1996, vol. 6, № 2, p. 539.
16. Aleksandrova I.V., Koresheva E.R., Osipov I.E. Free-standing targets for applications to ICF. — Ibid., 1999, vol. 17, № 4, p. 713.
17. Aleksandrova I.V., Koresheva E.R., Osipov I.E. et al. Microtomography data processing methods for cryogenic target characterization. — Ibid., p. 729.
18. Aleksandrova I.V., Belolipetskiy A.A., Golov V.I. et al. Progress in the development of tomographic information processing methods for applications to ICF target characterization. — Fusion Technology, 2000, vol. 38, № 2, p. 190.
19. Aleksandrova I.V., Bazdenkov S.V., Chtcherbakov V.I. Rapid fuel layering inside moving free-standing ICF targets: physical model and simulation code development. — In: Proc. of SPIE, 2001, vol. 4424, p. 197.
20. Aleksandrova I.V., Bazdenkov S.V., Chtcherbakov V.I. Rapid fuel layering inside moving free-standing ICF targets: modeling results. — Laser and Particle Beams, 2002, vol. 20, № 13, p. 13.
21. Chtcherbakov V.I., Bazdenkov S.V., Aleksandrova I.V. Integrated FST-layering code for the optimization of fuel ice formation in moving ICF/IFE capsules. — In: 27th European Conf. on Laser Interaction with Matter. Moscow, RF, 7—11 October, 2002.

22. **Aleksandrova I.V., Bazdenkov S.V., Chtcherbakov V.I.** Inverse algorithm for tomo-graphic analysis of backlit shadowgraphy for application to ICF targets diagnostics. — Ibid.
23. **Koresheva E.R., Krokhin O.N., Osipov I.E., Timasheva T.P., Yaguzhinskiy L.S.** Fuel cryogenic layer, fuel nucleus and method of its obtaining. Patent of RF, tender № 2001121680 of 9 August 2001 (in Russian).
24. **Koresheva E.R., Osipov I.E., Timasheva T.P., Yaguzhinskiy L.S.** A new approach to form transparent solid layer of hydrogen inside a microshell: application to inertial confinement fusion. — J. Physics D: Applied Physics, 2002, vol. 35, p. 825.
25. **Aleksandrova I.V., Bazdenkov S.V., Chtcherbakov V.I. et al.** An efficient method of fuel ice formation in moving free standing ICF/IFE targets. — Ibid., 2004, vol. 37, p. 1163.
26. **Aleksandrova I.V., Belolipetskiy A.A., Pisarnitskaya E.A.** Target Quality Thresholding in ICF Research: Preprint of Dorodnitsyn Computing Center of Russian Academy of Sciences, Applied Mathematics. — Moscow, 2003. 75 p.
27. **Koresheva E.R., Osipov I.E., Aleksandrova I.V.** Free-standing target technologies for inertial confinement fusion: fabrication, characterization, delivery. — Laser and Particle Beams, 2005, vol. 23, p. 563.
28. **Koresheva E.R., Nikitenko A.I., Aleksandrova I.V. et al.** Possible approaches to fast quality control of IFE targets. — Nuclear Fusion, 2006, vol. 46, p. 890.
29. **Koresheva E.R., Osipov I.E., Aleksandrova I.V. 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, 2007, vol. 28, № 2, p. 163.
30. **Aleksandrova I.V., Chtcherbakov V.I., Koresheva E.R. et al.** Large cryogenic target formation in a special R&B cell: mathematical modeling and experimental results. — In: 29th European Conf. on Laser Interaction with Matter. Madrid, Spain, 10—14 June, 2006.
31. **Aleksandrova I.V., Koresheva E.R., Osipov I.E. et al.** Cryogenic fuel targets for inertial fusion: optimization of fabrication and delivery conditions. — J. Russian Laser Research, 2007, vol. 28, № 3, p. 207.
32. **Aleksandrova I.V., Belolipetskiy A.A., Koresheva E.R.** Problem state of the cryogenic fuel targets in present-day program of inertial thermonuclear fusion. — Vestnik RAEN (Herald of the RANS), 2007, vol. 7, № 2, p. 37 (in Russian).
33. **Aleksandrova I.V., Koresheva E.R., Koshelev E.L. et al.** A key to the problem of cryogenic target survival during its delivery to the burn area. — VANT. Ser. Termoyadernyi sintez (Problems of Atomic Science and Technology. Ser. Thermonuclear Fusion), 2007, issue 3, p. 27 (in Russian).
34. **Aleksandrova I.V., Koresheva E.R., Koshelev E.L. et al.** Multi-criteria optimization for the delivery process of IFE targets with a different fuel structure. — In: 2nd IAEA RCM on Coordinated Research Project «Pathways to Energy from Inertial Fusion — an Integrated Approach». Prague, Czech Republic, 19—23 May, 2008.
35. **Aleksandrova I.V., Belolipetskiy A.A., Koresheva E.R. et al.** Thermal and mechanical responses of cryogenic targets with a different fuel layer anisotropy during delivery process. — J. Russian Laser Research, 2008, vol. 29, № 5, p. 419.
36. **Aleksandrova I.V., Belolipetskiy A.A., Koresheva E.R., Tolokonnikov S.M.** Survivability of fuel layers with a different structure under conditions of the environmental effects: physical concept and modeling results. — Laser and Particle Beams, 2008, vol. 26, № 4, p. 643.
37. **Aleksandrova I.V., Belolipetskiy A.A., Blazejic A. et al.** Cryogenic targets for the LAPLAS experiments: fabrication, manipulation and survival study. Report P034. — In: 30th European Conf. on Laser Interaction with Matter. Darmstadt, Germany, 31 Aug.— 5 Sept., 2008.
38. **Koresheva E.R., Aleksandrova I.V., Koshelev E.L. et al.** A study on fabrication, manipulation and survival of cryogenic targets required for the experiments at the facility for antiproton and ion research: FAIR. — Laser and Particle Beams, 2009, vol. 27, p. 255.
39. **Aleksandrova I.V., Belolipetskiy A.A., Kalabuhov V.A. et al.** FST-technologies for high rep-rate production of HiPER scale cryogenic targets. — In: Proc. of SPIE, 2011, vol. 8080, p. 80802M.
40. **Aleksandrova I.V., Belolipetskiy A.A., Koresheva E.R. et al.** A specialized layering module for high rep-rate producing of free standing HiPER targets. — In: Intern. Conf. on Fusion Science and Applications. Bordeaux, France, 12—16 September, 2011.
41. **Aleksandrova I.V., Belolipetskiy A.A., Koresheva E.R. et al.** Optimization steps to filling a batch of hiper-scale shells from full-density and porous polymers with a highly-pressurized D₂/DT fuel (1000 atm): results of modeling and experiments. — VANT. Ser. Termoyadernyi sintez (Problems of Atomic Science and Technology. Ser. Thermonuclear Fusion), 2011, issue. 4, p. 22 (in Russian).
42. **Aleksandrova I.V., Belolipetskiy A.A., Koresheva E.R. et al.** Cryogenic targets for reactor. Part I. Diffusion fuel filling of spherical shells: Preprint № 4, P.N. Lebedev Physical Institute of the Russian Academy of Sciences, Moscow, 2012. 134 p. (in Russian).
43. **Aleksandrova I.V., Belolipetskiy A.A., Koresheva E.R. et al.** Cryogenic targets for reactor. Part II. Characterization of cryogenic targets: Preprint № 11, P.N. Lebedev Physical Institute of the Russian Academy of Sciences, Moscow, 2013. 154 p. (in Russian).
44. **Aleksandrova I.V., Belolipetskiy A.A., Koresheva E.R. et al.** Cryogenic targets for reactor. Part III. Method FST: forming of solid hydrogen fuel inside the moving spherical shell: Preprint № 11, P.N. Lebedev Physical Institute of the Russian Academy of Sciences, Moscow, 2014. 200 p. (in Russian).
45. **Aleksandrova I.V., Koresheva E.R., Koshelev E.L., Osipov I.E.** Pilot target supply system based on the FST technologies: main building blocks, layout algorithms and results of the testing experiments. — Plasma and Fusion Research, 2013, vol. 8, № 2, p. 3404052.
46. **Aleksandrova I.V., Koresheva E.R., Osipov I.E. et al.** Ultra-fine fuel layers for application to ICF/IFE targets. — Fusion Science and Technology, 2013, vol. 63, p. 106.
47. **Aleksandrova I.V., Ivanenko O.M., Kalabukhov V.A. et al.** HTSC maglev systems for IFE target transport applications. — J. Russian Laser Research, 2014, vol. 35, p. 151; doi: 10.1007/s10946-014-9410-y.
48. **Sater J.D., Koziowski B.J., Collins G.W. et al.** Cryogenic D—T fuel layers formed in 1mm spheres by beta-layering. — Fusion Technology, 1999, vol. 35, p. 229.
49. **McCroly R.L., Bahr R.E., Betti R. et al.** OMEGA ICF experiments and preparation for direct drive ignition on NIF. — Nuclear Fusion, 2001, vol. 41, № 10, p. 1413.
50. **Harding D.R., Elasky L.M., Verbridge S. et al.** Formation of deuterium-ice layers in OMEGA targets. — In: LLE Review, Quarterly Rept., 2004, vol. 99, p. 160.
51. **Official site of HiPER program:** <http://www.hiper-laser.org/> (in Russian).
52. **Cavailler C., Fleuret N., Lonjaret T. et al.** Prospects and progress at LIL and megajoule. — Plasma Physics & Controlled Fusion, 2004, vol. 41, p. B135.

53. Nakai S., Miley J. Physics of high power laser and matter interactions. — Word Scientific Publishing, Singapore, 1992.
54. Goodin D.T., Alexander N.B., Brown L.C. et al. Demonstrating a target supply for inertial fusion energy. — In: 3rd IAEA RCM on Physics and Technology of IFE Targets and Chambers. Daejeon, Rep. Korea, 11—13 October, 2004, <http://aries.ucsd.edu>.
55. Bringa E.M., Caro A., Victoria M. et al. Atomistic modeling of wave propagation in nanocrystals. — Minerals, Metals and Materials Society, 2005, vol. 57, № 9, p. 67.
56. Cook R.C. A model study of the possible effect of beryllium grain sound speed anisotropy on ICF capsule implosions. — Fusion Science and Technology, 2002, vol. 41, p. 155.
57. Wanner R., Meyer H. Sound velocity in solid hydrogen and deuterium. — Physics Letters, 1972, vol. A 41, № 3, p. 189.
58. Gus'kov S.Yu., Zmitrenko N.V., Rozanov V.B. Effect of the initial phase state of DT-matter on the compression of inertial fusion targets. — J. Russian Laser Research, 2011, vol. 32, p. 596.
59. Guerrero C., Cuesta-Lopez S., Perlado J.M. Multiscale study of hydrogen isotopes structural properties in solid phase in the context of inertial fusion target manufacturing. — In: 7th Intern. Conf. on Inertial Fusion Sciences and Applications. Bordeaux, France, 12—16 September, 2011.
60. Merkul'ev Yu.A., Akunets A.A., Borisenko N.G. et al. New technologies in inertial thermonuclear fusion. Report of 8-th Zababakhin scientific readings. Snezhinsk, Russia, 5—9 September 2005 (in Russian).
61. Roder H.M., Childs G.E., McCarthy R.D., Angerhofer P.E. Survey of the properties of the hydrogen isotopes below their critical temperature. — In: NBS Technical Note, Monograph 74, 1965.
62. Souers P.C. Hydrogen Properties for Fusion Energy. — Lawrence Livermore National Laboratory, University of California Press, 1986. 203 p.
63. Laser thermonuclear targets and ultrastrong microballoons. Proceedings of the P.N. Lebedev Physical Institute of the Russian Academy of Sciences. Vol. 220. — M.: Nauka (Science), 1992. 198 p. (in Russian).
64. Kucheev S.O., Hamza A.V. Condensed hydrogen for thermonuclear fusion. — J. Appl. Phys., 2010, vol. 108, p. 091101.
65. Database Information Library of UCLA: http://aries.ucsd.edu/pulsifer/PROPS/mech_solid_hydrn.shtml.
66. Tret'yakov Yu.D., Gudilin E.A. Synthesis of «levitating» high-temperature superconducting materials: from fantastic to reality. — M.: Khimiya (Chemistry), 2001. 408 p. (in Russian).
67. Aleksandrova I.V., Belolipetskiy A.A., Koresheva E.R. et al. Insight into the relation between the fuel microstructure and IFE targets response under their fabrication, injection and transport through the reaction chamber. — In: 1st Conf. on Laser Inertial Fusion Energy. Yokohama, Japan, 26—27 April, 2012.
68. Koresheva E.R. High rep-rate production of IFE targets using the FST technologies: progress results and aspects of commercialization. — Ibid.
69. Aleksandrova I.V., Koresheva E.R., Koshelev E.L. et al. Mechanical model of ITF reactor for optimization of frequency formation technologies and cryogenic fuel targets delivery. Report of XLI-th International conference on plasma physics and CTF. Zvenigorod, Russia, 10—14 February, 2014 (in Russian).
70. Aleksandrova I.V., Koresheva E.R., Osipov I.E. Factory conception of cryogenic targets for ITF. Report of XLII-d International conference on plasma physics and CTF. Zvenigorod, Russia, 9—13 February 2015 (in Russian).

AUTHORS

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

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

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

Osipov I.E. Co Ltd «Inter RAO UES Power Efficiency Centre», Bol'shaya Pirogovskaya ul. 27-2, Moscow, Russia

Received 29 May 2015
Problems of Atomic Science and Technology
Ser. Thermonuclear Fusion, 2015, vol. 38, issue 3, pp. 59—82.