УДК 621.039.633

КРИОГЕННОЕ ВОДОРОДНОЕ ТОПЛИВО ДЛЯ УПРАВЛЯЕМОГО ИНЕРЦИАЛЬНОГО ТЕРМОЯДЕРНОГО СИНТЕЗА (ФОРМИРОВАНИЕ КРИОГЕННЫХ МИШЕНЕЙ РЕАКТОРНОГО КЛАССА)

*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, Россия²Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Москва, Россия³Интер РАО ЕЭС, Центр энергоэффективности, Москва, Россия

В настоящее время быстрыми темпами развиваются те области исследования, которые связаны с разработкой специализированного модуля для высокочастотного и рентабельного производства мишеней в системах управляемого инерциального термоядерного синтеза (ИТС). Получаемые мишени должны быть бесподвесными, т.е. свободными, или незакреплёнными на каком-либо подвесе. Это является принципиальным условием. Необходимым условием является также и требование минимизации количества трития в мишенной системе, т.е. минимизации всех временных и пространственных масштабов каждой производственной стадии. При этом криогенное водородное топливо внутри мишени должно иметь такую структуру (ультрадисперсную или нанокристаллическую), которая обеспечит сохранение качества топливного слоя при ускорении, инжекции и транспорте мишени в камере реактора ИТС. Значительный прогресс в решении поставленных задач достигнут при разработке технологии, основанной на методе FST (free-standing target) формирования твёрдого топливного слоя внутри движущихся бесподвесных оболочек, предложенном и развитом в ФИАН. В настоящей статье представлены результаты исследований, полученные при создании модуля FST-формирования мишеней различного класса с ультрадисперсной структурой топлива, включая также и мишени реакторного класса. Практическим воплощением данной инновационной технологии станет уже начатая в ФИАН разработка прототипа фабрики мишеней для мощных лазерных установок и реактора ИТС.

Ключевые слова: инерциальный термоядерный синтез (ИТС), FST-метод, ультрадисперсная структура криогенного водородного топлива, реакторные мишени.

CRYOGENIC HYDROGEN FUEL FOR CONTROLLED INERTIAL CONFINEMENT FUSION (FORMATION OF REACTOR-SCALED CRYOGENIC TARGETS)

*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, Russia²National Research Nuclear University «MEPhI» (Moscow Engineering Physics Institute), Moscow, Russia³Inter RAO UES, Power Efficiency Centre, Moscow, Russia.

In inertial fusion power research, a considerable attention has recently been focused on the ability to inexpensively fabricate large quantities of targets by developing a specialized layering module of repeatable operation. The targets must be free-standing, or unfixed. Therefore, the development of a target factory for inertial confinement fusion (ICF) is centered at methods that can ensure a cost-effective target production with high-repeatability. Tritium inventory minimization (i.e. minimization of time and space for all production steps) is a necessary condition as well. Additionally, the cryogenic hydrogen fuel inside the targets must have such a structure (ultrafine layers — the grain size should be scaled back into the nanometer range), which supports the fuel layer survivability under target injection and transport through the reactor chamber. To meet the above requirements, at the Lebedev Physical Institute (LPI), significant progress has been made in the technology development based on rapid fuel layering inside moving free-standing targets, which refers to as FST (free-standing target) layering method. As a result of research, the LPI gained a unique experience in the development of the FST-layering module for target fabrication with an ultrafine fuel layer, including a reactor-scaled target design. This experience will be used at the development of the next-generation FST-layering module for construction of a prototype of the target factory for power laser facilities and inertial fusion power plants.

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

ВВЕДЕНИЕ

В резюме совещания МАГАТЭ по проблемам Управляемого термоядерного синтеза в 2008 г. отмечалось следующее важное обстоятельство: «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») [1]. Для эффективной работы реактора необходимо, чтобы зона термоядерного горения пополнялась топливом с частотой 1—10 Гц. Поэтому фабрика мишеней является неотъемлемой частью реактора, задачей которой является производство необходимого массива бесподвесных мишеней и их подача в систему инжекционной доставки топлива.

Исследования в области технологии свободных бесподвесных мишеней интенсивно ведутся в Физическом институте им. П.Н. Лебедева (ФИАН), начиная с 1980-х годов. В частности, в ФИАН разработан метод FST, в основу которого положен принцип работы с движущимися бесподвесными мишенями, что позволяет быстро (менее чем за 15 с) формировать криогенные мишени в непрерывном режиме или с необходимой частотой [1—3]. Это достигается за счёт 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. Стабилизация получаемых структур достигается за счёт введения в состав топлива легирующих добавок [2]. Термин ультрадисперсный слой относится к состоянию топлива, которое характеризуется малой длиной упорядоченности, т.е. малым размером зерна d . В работе [4] предложена следующая классификация: субмикронный диапазон ($d = 0,1—0,3$ мкм), нанокристаллический (обычно $d \leq 100$ нм), аморфное состояние (характерный размер параметра ~ 1 нм). Очень часто для субмикронного диапазона используется термин мелкозернистая структура. Необходимый уровень структурирования топлива определяется требованиями по физике сжатия мишеней [5]: 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. Подчеркнём, что в настоящее время именно метод FST обеспечивает формирование изотропных слоёв криогенного водородного топлива внутри движущихся сферических оболочек. Такие слои относятся к классу слоёв, перспективных для производства криогенных мишеней требуемого качества и сохранения параметров мишени в процессе её доставки в камеру реактора ИТС [1—3].

В настоящее время в ФИАН создано лабораторное оборудование (рис. 1), которое моделирует весь процесс приготовления незакреплённой криогенной мишени — от её заполнения топливом до осуществления доставки (или, другими словами, инжекции мишени) в лазерный фокус. Процесс формирования слоя внутри массива движущихся оболочек методом FST осуществляется при инжекционном транспорте бесподвесной мишени между основными функциональными элементами системы: мишенный контейнер (МК)—канал формирования (КФ)—тестовая камера (ТК). Цикл формирования реализуется следующим образом. Находящиеся в контейнере оболочки с жидким (или газообразным) топливом инжектируются в КФ, который представляет собой специальную вставку в криостат в виде вакуумированной трубки с охлаждаемыми стенками, что и обеспечивает вымораживание топлива в движущейся оболочке. В канале мишени движутся в

Рис. 1. Экспериментальная FST-установка (сделано в ФИАН): *a* — функциональная схема; *б* — общий вид; *в* — канал FST-формирования в сборке с ТК; *г* — готовая криогенная мишень; *д* — гравитационный инжектор; *1* — модуль FST-формирования (оболочки с топливом поступают от системы заполнения внутри МК); *2* — МК; *3* — спиральный КФ; *4* — ТК; *5* — элементы 100-проекционного видеотомографа для прецизионного контроля качества мишеней; *б* — оптический монтажный стол

быстрой последовательности, одна за другой, что позволяет реализовать частотную инжекцию готовых криогенных мишеней в ТК. Фактически ТК представляет собой устройство, которое используется в FST-экспериментах для температурной и томографической диагностики параметров сформированных мишеней [3], а также служит промежуточным узлом в системе транспорта мишеней на стартовую позицию в инжектор [6]. Отметим, что модуль формирования (МФ) работает одновременно с массивом бесподвесных мишеней (реакторные технологии). При этом мишени остаются незакреплёнными на всех этапах производства. Важным является и то обстоятельство, что экстремально высокие скорости FST-охлаждения ($1\text{—}50\text{ К/с}$) по сравнению с традиционными методами формирования слоя ($\sim 3 \cdot 10^{-5}\text{ К/с}$) [1] отвечают требованию по минимизации запасов радиоактивного трития в мишенной системе, т.е. минимизации всех временных и пространственных масштабов каждой стадии производства мишени. Работа МФ позволяет минимизировать запасы трития в элементах мишенной системы за счёт следующих особенностей метода FST [3]:

- минимальный пространственный масштаб FST-системы за счёт плотной упаковки незакреплённых мишеней;

- минимальный временной масштаб FST-системы за счёт минимального времени формирования слоя: менее 15 с при реализации высоких скоростей охлаждения топлива в мишени (в традиционных технологиях более 24 ч) [1];

- инжекционный транспорт мишеней между основными функциональными элементами МФ (отсутствует хранение мишеней на промежуточных стадиях).

Моделирование работы МФ потребовало создания широкой физико-математической базы для формализации задачи «Технология производства криогенного топливного слоя по методу FST». Такая база должна обеспечивать средства для решения ключевых технических и инженерных задач при разработке и конструировании МФ. Наиболее важным аспектом деятельности в этом направлении является изучение физических закономерностей, лежащих в основе процесса формирования топливного слоя, и возможности их адекватного математического описания. Для расчёта рабочих параметров МФ необходимо учесть основные физические явления, определяющие именно стадию формирования. В связи с этим становится важной роль их математического моделирования, которое по существу играет роль гибкого инструмента в процессе поиска оптимального решения задачи. Теоретические и экспериментальные результаты, полученные в этом направлении, детально обсуждаются в работе [3] (см. также литературу к ней). Они легли в основу построения FST-системы ($\nu = 0,1\text{ Гц}$), созданной и испытанной в ФИАН для мишеней $\varnothing \leq 2\text{ мм}$ (см. рис. 1). Следующий важный этап исследований — выполнение эскизного проектирования МФ для обеспечения топливом экспериментов по ударному сжатию мишеней на лазерной установке HiPER (High Power laser Energy Research, $E_L = 200\text{ кДж}$, $\nu \geq 1\text{ Гц}$, $\varnothing > 2\text{ мм}$) [7]. Эта работа была выполнена в период 2009—2011 гг. в рамках проекта МНТЦ № 3927 [8, 9].

Подчеркнём, что в настоящее время метод FST — самая дешёвая технология в мире (создание FST-системы в ~ 100 раз дешевле, чем любой другой мишенной системы, основанной на традиционной технологии) [1]. Это определяется теми физическими принципами, которые положены в основу метода FST [3]:

- динамическая симметризация жидкого топлива, т.е. симметризация слоя, обусловленная свободным вращением мишени при её движении в КФ;

- вымораживание топлива на внутренней поверхности оболочки за счёт контактной теплопроводности между движущейся оболочкой и стенкой КФ. Прижимаясь к холодной стенке канала, оболочка слегка деформируется, и образуется контактное пятно $S_{ca} = \chi S_{sh}$, где S_{sh} — площадь поверхности оболочки, χ — параметр задачи, который учитывает не только геометрические, но и тепловые особенности при формировании пятна контакта. На практике образуется эффективное пятно контакта $\chi_{эф} = \text{геометрическое } (\chi_g) + \text{тепловое } (\chi_t)$.

В экспериментах используются КФ различного дизайна. Для геометрии 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 τ_{res} пребывания мишени в КФ, которое должно быть больше, чем время вымораживания криогенного слоя τ_{form} на внутренней поверхности движущейся оболочки. Варьируя перечисленные параметры, можно оптимизировать метод FST для формирования мишеней любого уровня.

Настоящая работа является продолжением темы «Криогенное водородное топливо для управляемого инерциального термоядерного синтеза», в которой мы детально рассмотрим особенности FST-формирования криогенных мишеней прямого сжатия, начиная от дизайна мишеней для установки OMEGA [10] до мишеней реакторного класса [11].

FST-ФОРМИРОВАНИЕ МИШЕНЕЙ КЛАССА OMEGA ДЛЯ ЭНЕРГИИ ЛАЗЕРА $E_L = 30$ кДж

Классическая криогенная мишень (мишень прямого сжатия), применяемая в экспериментах по ИТС, представляет собой систему вложенных шаровых слоёв, 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 слоёв [1]. Чтобы получить криогенный слой значительной толщины, полимерные оболочки предварительно заполняются до высокого внутреннего давления ($P_f \sim 1000$ атм. при комнатной температуре $T = 300$ К) газообразным топливом из изотопов водорода, включая радиоактивный тритий в составе эквимолярной DT-смеси (50% молекул DT, 25% дейтерия (D_2) и 25% трития (T_2)).

Криогенные мишени прямого сжатия образуют линейку, начало которой соответствует дизайну мишеней для установки OMEGA. В настоящее время для формирования мишеней класса OMEGA [10] (внутренний радиус оболочки $R_0 = 460$ мкм, толщина стенки оболочки $\Delta R = 3$ мкм, толщина криогенного слоя $W = 100$ мкм) применяются традиционные технологии, которые базируются на достаточно медленном охлаждении топлива ($\sim 3 \cdot 10^{-5}$ К/с) в неподвижной мишени. Одновременно с процессом выращивания слоя типа «монокристалл» осуществляется его выравнивание по толщине с помощью метода IR-redistribution (для D_2 -топлива) либо способом β -layering (для DT-смеси) [1], так что симметризация слоя осуществляется за счёт перераспределения твёрдого топлива внутри оболочки. Это приводит к значительному увеличению времени формирования слоя (от 5 до 24 ч), что исключает возможность минимизировать запасы трития в мишенной системе. Кроме того, экспериментально показано, что такие слои неустойчивы к вариациям температуры и при охлаждении трескаются из-за напряжений, связанных с изменением плотности вещества. Указанная неустойчивость есть следствие двух причин [1]: анизотропии прочности кристаллических водородов и снижения прочности DT-слоя за счёт накопления пузырьковых дефектов из-за выделения ^3He при β -распаде трития. Так, например, измерения, выполненные в работе [12], показали, что при уменьшении температуры менее чем на 2 К гладкость поверхности криогенного слоя падает более чем в 2 раза: с $\varepsilon_2 = 2,0$ мкм до $\varepsilon_2 = 4,5$ мкм (рис. 2).

Получение термостойких криогенных слоёв связано с переходом к методу FST, что означает реализацию высоких скоростей охлаждения — до десятков градусов в секунду. При этом выравнивание слоя по толщине осуществляется за счёт механизма динамической симметризации жидкого топлива. Рассчитаем

Рис. 2. Дegradaция качества поверхности криогенного слоя для мишеней класса OMEGA при изменении температуры

время τ_{form} формирования мишени класса OMEGA методом FST. Исходные данные для расчёта взяты из работ [13—15]. Согласно методу FST две стадии будут важными при формировании мишени (процедура расчёта детально описана в работе [3]):

- первая стадия: охлаждение жидкой фазы топлива от начальной температуры $T_{\text{in}} = 37,0$ К до температуры тройной точки T_{tp} (время τ_{liquid});
- вторая стадия: вымораживание слоя при температуре $T = T_{\text{tp}}$ (время τ_{solid}).

Полное время формирования составит величину $\tau_{\text{form}} = \tau_{\text{liquid}} + \tau_{\text{solid}}$. Результаты расчётов для мишени класса OMEGA и D_2 -топлива представлены в табл. 1 и 2. Хорошо видно, что эффективное пятно контакта $\chi_{\text{эф}}$ (см. табл. 2) мало меняется при переходе от одной стадии формирования к другой. Поэтому в дальнейшем можно пользоваться средней величиной « $\chi_{\text{эф}}$ ». Следует также отметить, что в литературе отсутствуют данные о теплопроводности DT-смеси в

диапазоне температуры 39—20 К. Поэтому для DT-слоя мы вынуждены ограничиться лишь оценками, которые дают $\tau_{\text{form}} = 5,34$ с.

Т а б л и ц а 1. Параметры мишени класса OMEGA

Параметр	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

Т а б л и ц а 2. Время FST-формирования криогенного слоя из D₂ для мишени класса OMEGA

Стадия	R _{са} , мкм	$\chi_g, \times 10^{-4}$	R _{эф} , мкм	$\chi_{эф}, \times 10^{-4}$	τ_{liquid} , с	τ_{solid} , с	τ_{form} , с
Первая стадия	12,0	1,70	42,9	21,7	3,4		4,8
Вторая стадия			41,5	20,4		1,4	

Примечание: R_{са} и R_{эф} — радиусы геометрического и эффективного пятна контакта.

Резюме. Мы показали, что реализация высоких скоростей охлаждения методом FST позволяет за малое время сформировать криогенный DT-слой для мишеней класса OMEGA, а значит обеспечить минимизацию расхода трития в мишенной системе. Особо подчеркнём, что достижение высоких скоростей охлаждения имеет огромное значение и с точки зрения получения заданной структуры топлива. Мы имеем в виду формирование изотропных ультрадисперсных слоёв, обладающих повышенной механической и тепловой устойчивостью. Кроме того, реализация формирования слоя в движущихся оболочках является прекрасной перспективой для перехода к частотному производству мишеней. Это означает, что метод FST может служить основой для создания технологии формирования мишеней для мощных лазерных установок и реактора ИТС.

FST-ФОРМИРОВАНИЕ МИШЕНЕЙ КЛАССА HiPER ДЛЯ ЭНЕРГИИ ЛАЗЕРА $E_L = 200$ кДж

Высокочастотная подача топлива является необходимым условием проведения современных экспериментов по ИТС и перехода к реакторным технологиям производства топливных криогенных мишеней.

С этой целью в Европе создаётся мощная лазерная установка HiPER (High Power laser Energy Research) [7], работа которой потребует формирования и доставки криогенных топливных мишеней ударного поджига с частотой $\nu \geq 1$ Гц. В настоящее время рассматриваются два типа оболочек для базовой мишени класса HiPER, геометрические параметры которых, а также параметры топливного слоя представлены в табл. 3 и 4.

Т а б л и ц а 3. Геометрические параметры мишени типа BT-2

Параметр	Внешний слой (компактный полимер)	Топливный слой (из чистого D ₂)
Внешний радиус, мкм	1047	1044
Толщина слоя, мкм	3	211
Внутренний радиус, мкм	1044	833

Т а б л и ц а 4. Геометрические параметры мишени типа BT-2a

Параметр	Внешний слой (компактный полимер)	Внутренний слой (полимерная пена + D ₂)	Топливный слой (из чистого D ₂)
Внешний радиус, мкм	1023	1020	950
Толщина слоя, мкм	3	70	120
Внутренний радиус, мкм	1020	950	830

Напомним, что мишень должна быть бесподвесной и формироваться методом FST. В настоящее время это единственный метод, работающий с незакреплёнными движущимися оболочками, что является принципиальным условием, которое позволяет осуществить частотное формирование мишени и её инжекцию в лазерный фокус.

Проектирование модуля FST-формирования для обеспечения экспериментов по программе HiPER сферическими криогенными мишенями ($\varnothing \sim 2$ мм, $W \sim 200$ мкм) выполнено в ФИАН в сотрудничестве с ФГУП «Красная Звезда» и ООО «Крио Трэйд» в рамках проекта МНТЦ № 3927 [8, 9] и при финансовой поддержке Совета научно-технических ресурсов (Великобритания) [7]. В данном проекте проведён экспертный анализ и доказана возможность формирования мишеней класса HiPER методом FST. Полученные результаты были использованы при дизайне FST-модуля формирования для мишеней указанного типа (далее — FST-МФ-HiPER). Цель настоящего раздела — детально обсудить результаты, полученные в рамках проекта МНТЦ № 3927, которые представляют значимый базовый контент при переходе к реакторным мишеням. Технологически алгоритм проведения экспериментов по FST-формированию мишеней реализуется следующим образом (рис. 3):

Рис. 3. Полный цикл FST-формирования криогенной топливной мишени

- заполнение оболочек топливным газом при комнатной температуре (300 K);
- после процедуры заполнения при 300 K МК с заполненными оболочками переносится при той же температуре от системы заполнения к МФ для последующего проведения экспериментов методом 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 него топлива, находящегося вне оболочек;
- следующий шаг — проброс мишеней в КФ, т.е. собственно формирование криогенного слоя внутри движущейся оболочки (метод FST);
- на выходе из КФ готовые мишени инжектируются в ТК.

Далее мы рассмотрим вопросы подготовки FST-экспериментов для мишеней класса HiPER с учётом особенностей всех стадий процесса формирования мишени, за исключением процедуры томографической характеристики, которая детально описана в обзорной работе [16] (см. также литературу к ней). При этом учитывается возможность работы прототипа FST-МФ-HiPER не только как автономного устройства, но и как интегральной части установки по частотному производству мишеней, их сборки со специальным носителем (саботом), а также инжекционной доставке пары «мишень + сабот» в фокус мощной лазерной установки.

Для достижения поставленной цели необходимо определить набор параметров, который позволяет провести оптимизацию замкнутого цикла FST-формирования для производства мишеней любого класса. Приведём перечень основных параметров оптимизации:

- требуемые плотность ρ_f и давление P_f при заполнении оболочки ($T = 300$ K), допустимый перепад давления на стенке оболочки ΔP , скорость заполнения dP/dt и время заполнения t_f ;
- температура разгерметизации T_d и давление топлива внутри мишени при этой температуре;
- оптимальная температура входа мишени в канал формирования T_{in} и давление топлива внутри мишени при этой температуре;
- геометрия КФ и время формирования τ_{form} .

Заполнение массива бесподвесных оболочек D₂- и DT-топливом. Наиболее распространённым способом заполнения оболочек топливным газом является диффузия. Задача минимизации объёмов трития, а также радиационных дефектов, возникающих в стенке полимерной оболочки вследствие его расхода, требует тщательного анализа процесса заполнения одно- и многослойных оболочек газообразным

топливом. Кроме того, построение системы заполнения (СЗ) с параметрами $P_f = 1000$ атм. при $T = 300$ К требует точного знания зависимости внутреннего давления газа в оболочке от времени для различных схем заполнения [17—19]. Поскольку прочностные параметры и коэффициенты газопроницаемости материалов стенки мишени могут быть переменными величинами, то на первое место в исследовании проблемы заполнения оболочек 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 расчёта времени и скорости заполнения. Полученные результаты (рис. 4) позволяют заключить, что СЗ, существующая в ФИАН, может реализовать работу с массивом бесподвесных оболочек (как ВТ-2, так и ВТ-2а) и заполнить их до 1000 атм. при комнатной температуре. При этом осуществляется прецизионная подача давления в МК (менее 1 атм./мин), чтобы не разрушить находящиеся в нём оболочки с низкой прочностью (например, полистирол или полимер glow discharge plasma (GDP)). СЗ ФИАН также может осуществить заполнение и более прочных оболочек, например, из полиимида [19, 20].

В основу работы СЗ полимерных оболочек положена идея непрерывного (или квазинепрерывного) повышения давления в камере заполнения таким образом, чтобы разность давлений внутри и снаружи оболочки ΔP не превышала некоторой величины, определяемой прочностью оболочки. При этом осуществляются автоматический контроль и управление рабочими характеристиками СЗ.

Отметим, что расчёт процедуры заполнения позволяет определить время достижения заданного давления на любой промежуточной стадии. В табл. 5 первая строка для каждого вида топлива соответствует заполнению однослойной оболочки типа ВТ-2 с параметрами $R_0 = 1020$ мкм, $\Delta R = 3$ мкм. Это оболочка ВТ-2а (вторая строка), 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 $W_{\text{porous}} = 0$.

Рис. 4. Управляющая кривая, или скорость заполнения (до 1000 атм. при 300 К) как функция времени для трёх различных материалов оболочки: ■ — полиимид; ▲ — полистирол; ● — GDP-полимер

Таблица 5. Время заполнения оболочек класса HiPER в режиме *ramp filling*

Топливо	t_{f200}	t_{f400}	t_{f600}	t_{f800}	t_{f1000}
D ₂ -топливо					
ВТ-2	10,97	19,38	26,05	31,45	35,93
ВТ-2а	13,72	24,26	32,59	39,36	44,96
DT-топливо					
ВТ-2	12,57	22,21	29,85	36,05	41,18
ВТ-2а	15,69	27,74	37,28	45,01	51,42

Примечание: t_{f200} , t_{f400} , t_{f600} , t_{f800} , 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 механическая прочность оболочки, несомненно, являются функцией её структуры: радиационные дефекты, накапливаясь со временем, приводят к структурным изменениям в полимерных материалах (актуально как для ВТ-2, так и для ВТ-2а). В свою очередь, это ведёт к изменению прочности и газопроницаемости самой 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 t_f . В связи с этим в проекте осуществлено моделирование скорости заполнения полимерных

оболочек типа HiPER при наличии радиационных дефектов, т.е. при учёте зависимости прочности и проницаемости оболочки от времени.

Для создания математической модели процесса заполнения тонкостенной сферической оболочки до высоких давлений был предложен подход, основанный на решении краевой задачи Коши для нелинейных параболических уравнений с нелинейными граничными условиями [19, 20].

Нелинейность модели связана как с нелинейностью зависимости давления от плотности газа (уравнение Ван-дер-Ваальса), так и с влиянием некоторых параметров системы «полимерная оболочка—топливный газ» на режим заполнения. 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.

Результаты численного решения задачи о заполнении однослойной BT-2 и двухслойной BT-2a оболочек DT-смесью при наличии радиационных дефектов в материале оболочки приведены далее. Расчёты выполнены при следующих условиях:

— приоритетный материал внешнего слоя оболочки [7] — GDP-полимер ($1,2\text{—}1,04\text{ г/см}^3$), для которого модуль Юнга равен $E = 2,6\text{ ГПа}$, коэффициент Пуассона $\nu = 0,3$;

— газопроницаемость GDP-полимера по отношению к DT-смеси в случае, если радиационные дефекты не существенны, равна $K_{DT} \sim 5,8 \cdot 10^{-15}\text{ моль} \cdot \text{м}/(\text{м}^2 \cdot \text{с} \cdot \text{Па})$;

— газопроницаемость пористого слоя $K_2 = 100 K_1$, где $K_1 = K_{DT} = 5,8 \cdot 10^{-15}\text{ моль} \cdot \text{м}/(\text{м}^2 \cdot \text{с} \cdot \text{Па})$ есть коэффициент газопроницаемости внешнего слоя из компактного GDP-полимера;

— заполнение DT-смесью: $\gamma = \gamma_1 = \gamma_2 = \gamma_3 = 0$ — радиационные дефекты отсутствуют (кривая маркирована ромбом); 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 оболочки запишем в виде $K_i = K_i^0 (1 + \gamma_i)$, где $i = 1, 2$ — номер слоя, допустимый перепад давления на стенке оболочки как $\Delta P = \Delta P_0 (1 - \gamma_3)$. Коэффициенты K_i^0 и ΔP_0 соответствуют значениям для нерадиоактивного топлива.

Результаты расчёта представлены на рис. 5. Видно, что, накапливаясь со временем, радиационные дефекты приводят к увеличению времени заполнения t_f . Для случая мишени BT-2 указанный рост составляет $\sim 8\%$, для BT-2a $\sim 11\%$. Это, в свою очередь, может привести к изменению вида «управляющей кривой» $dP/dt = F(t)$, показанной на рис. 4. Поэтому для снижения рисков при использовании DT-смеси необходимо провести изучение свойств полимерных материалов (определение коэффициентов γ_i) и учесть полученные результаты при расчёте функции $F(t)$. Это позволит избежать разрушения полимерной оболочки и утечки радиоактивного трития из СЗ.

Рис. 5. Влияние радиационных дефектов на ход процесса заполнения DT-смесью оболочек типа BT-2 (а), BT-2a (б)

Подведём итог. Если радиационные дефекты существенны для материала оболочки, то это ведёт к изменению её прочности и газопроницаемости, которые необходимо теперь рассматривать как функции времени. При этом становится невозможной реализация процедуры заполнения полимерных оболочек DT-смесью при постоянном градиенте давления (т.е. режим ramp filling, или традиционное

заполнение нерадиоактивными топливными изотопами). Можно говорить лишь о работе системы заполнения в режиме *quasi-ramp filling* при условии малости коэффициентов γ_i , $i = 1, 2, 3$. Это означает, что при заполнении оболочек радиоактивным топливом в течение длительного времени необходимо иметь достоверную информацию о влиянии бета-распада трития на свойства используемых полимеров. Это позволит либо учесть возникающие изменения, либо перейти к рассмотрению других материалов в дизайне криогенной мишени.

Разгерметизация мишенного контейнера. После процедуры заполнения при 300 К МК с заполненными оболочками переносится при той же температуре от системы заполнения к МФ для последующего проведения экспериментов по методу FST. Перед началом экспериментов МК с заполненными оболочками, находясь внутри МФ, охлаждается до температуры разгерметизации T_d , существенно более низкой, чем комнатная температура. Это необходимо для удаления из МК балластного газа, находящегося вне оболочек.

Возможность осуществить процедуру разгерметизации МК в условиях, исключающих как разрушение оболочки внутренним давлением, так и утечку из неё топлива вследствие обратной диффузии, появляется лишь при условии понижения температуры, когда давление газа в оболочке падает, газопроницаемость её стенки снижается, а прочность оболочки растёт [21]. Так как давление газа в оболочке не зависит от материала стенки оболочки, то возможность осуществления того или иного варианта определяется лишь прочностью используемой полимерной оболочки σ и величиной её обратного аспектного отношения δ_{sh} . Это ещё раз подчёркивает важность надёжной исходной базы данных (как при комнатной, так и при криогенных температурах) по свойствам полимеров, используемых для производства криогенных мишеней.

Расчёты, определяющие условия безопасной разгерметизации МК, проводились согласно следующим формулам [19]:

$$\Delta P_{sh} = 2\sigma\delta_{sh}; \delta_{sh} = \frac{\Delta R}{R}, \quad (1)$$

где ΔP_{sh} — разность давлений внутри и вне оболочки непосредственно перед моментом её разрушения; σ — предел прочности оболочки на растяжение. Для определения условий разгерметизации, т.е. определения безопасного давления внутри оболочки P , использовалось уравнение Ван-дер-Ваальса, которое устанавливает связь между давлением газа в оболочке P , его температурой T и плотностью ρ_f :

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

где R_g — индивидуальная газовая постоянная, зависящая от плотности и температуры; μ — удельный молекулярный вес изотопа; T — абсолютная температура; a и b — параметры, зависящие от температуры. Уравнение (2) рассчитывалось по специальной программе с учётом зависимости параметров R_g , a и b от температуры [17, 18] для определения температуры разгерметизации T_d из условия

$$P(\rho_f, T_d) \leq \Delta P_{sh}, \quad (3)$$

где ρ_f — плотность топливного газа при заполнении ($T = 300$ К). Отметим, что величина T_d существенно ниже комнатной температуры и лежит в диапазоне $T_{tp} < T_d < 40$ К.

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

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

где ρ_c и ρ_v — плотность конденсированной (жидкой или твёрдой) и газовой фазы топлива; W — толщина криогенного слоя; R_0 — внутренний радиус оболочки.

Для анализа возможных ситуаций при разгерметизации МК удобно ввести параметр $\theta = \rho_f/\rho_{cp}$, где ρ_{cp} есть величина критической плотности для заданного топливного вещества. Для D_2 $\rho_{cp} = 69,8$ мг/см³, для DT-смеси $\rho_{cp} = 87,06$ мг/см³ [13, 14]. Заметим, что предел прочности материала оболочки на растяжение σ зависит от технологии изготовления и возрастает с понижением температуры [21], тогда как

Рис. 6. Зависимость давления от плотности при криогенных температурах для дейтерия: $T = 45$ (◆), 40 (■), $38,34$ К (▲); — — — BT-2

Рис. 7. Условия разгерметизации МК для различной прочности и толщины оболочки (важно при выборе материала мишени): $\sigma = 450$ (■), 350 (■), 250 (■), 150 (■), 100 МПа (■)

Рис. 8. Возможные фазовые состояния топлива в момент начала формирования слоя (T — S -диаграмма для мишени BT-2)

давление топливного газа падает (рис. 6). Поэтому принципиально могут реализоваться две ситуации (рис. 7 и 8): при определённой температуре T_d величина σ окажется достаточной для сброса давления в МК, когда топливо остаётся ещё газообразным ($T_d > T_{cr}$, где T_{cr} — температура в критической точке); в противном случае требуемое снижение давления может быть достигнуто только при температуре $T_d \leq T_{cr}$, что неизбежно приведёт к ожидению топлива в МК. Расчёты для мишеней BT-2 и BT-2a, содержащих как D_2 -, так и DT-топливо, показали, что реализация варианта, когда удаляется топливный газ, возможна лишь для высокопрочных оболочек (табл. 6).

Т а б л и ц а 6. Условия разгерметизации МК в зависимости от прочности оболочки

Оболочка	Прочность	Условия	Прочность	Условия
BT-2	$\sigma \geq 450$ МПа	Удаляется топливный газ $T_d > T_{cr}$	$\sigma < 350$ МПа	Удаляется жидкое топливо
BT-2a	$\sigma \geq 350$ МПа	Удаляется топливный газ $T_d > T_{cr}$	$\sigma < 350$ МПа	Полистирол: $31 \text{ K} \geq T_{in} > 20 \text{ K}$ (рис. 9)

При более низкой прочности разгерметизацию можно осуществить только в условиях, когда топливо находится в одном из двух состояний:

— сжатой жидкости ($T_s < T_d < T_{cr}$, где T_s — температура начала разделения на жидкую и газообразную фазы);

— двухфазном состоянии «жидкость + пар» ($T_{tr} < T_d < T_s$), которое реализуется в результате фазового перехода 1-го рода при охлаждении оболочки ниже линии насыщения (см. рис. 8).

С учётом некоторого запаса по прочности оболочки технологические рекомендации для проведения экспериментов по FST-формированию криогенного слоя топлива для мишеней класса HiPER представлены в табл. 6.

Для оболочек из полистирола ($\sigma_{сн} = 100$ МПа) или материалов с ещё более низкой прочностью нет необходимости проводить специальные расчёты ($\sigma_{сн} < 350$ МПа, топливо находится в двухфазном состоянии «жидкость + пар»). Однако мы можем воспользоваться соотношениями (1) и рассчитать величину ΔP_{sh} для определения оптимальной температуры T_{in} входа мишени в КФ. Для $\sigma_{сн} = 100$ МПа и оболочки BT-2 ($R_0 = 1044$ мкм, $\Delta R = 3$ мкм) внутреннее давление разрушения составляет всего лишь $\sim 5,7$ атм., для оболочки BT-2a ($R_0 = 1020$ мкм, $\Delta R = 3$ мкм) $\sim 5,9$ 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. (см. рис. 8), что ниже величины ΔP_{sh} как для ВТ-2, так и для ВТ-2а. В этом случае оптимальная температура входа мишени в КФ может быть выбрана чуть ниже $T_d \rightarrow T_{in} = 31,0$ К, что позволит реализовать максимальное время для симметризации слоя (рис. 9).

Что касается DT-топлива, то мы не располагаем справочными данными по давлению в диапазоне температуры 39—20 К (т.е. в двухфазной области «жидкость + пар» при $T_{tr} < T_d < T_s$). Поэтому вопрос о величинах T_d и T_{in} остаётся открытым до момента получения более полной информации по свойствам DT-смеси.

Температура T_{in} играет важную роль, так как определяет динамику газовой полости при понижении температуры мишени. В работе были проведены расчёты отношения R_{vb}/R_0 (R_{vb} — радиус газовой, или, точнее, паровой полости) для двух значений параметра θ , которые ограничивают

изохору формирования по плотности D_2 . Для D_2 и ВТ-2 $\rho_f = 97,0$ мг/см³ и $\theta_{ВТ-2} = 1,468$, для D_2 и ВТ-2а $\rho_f = 86,82$ мг/см³ и $\theta_{ВТ-2а} = 1,237$. Результаты расчётов отношения R_{vb}/R_0 представлены на рис. 9. Хорошо видно, что при температуре ниже 31 К динамика газовой полости выходит на линейный режим для большого диапазона изменения параметра θ : $1,237 < \theta_{ВТ-2а}$ и $\theta_{ВТ-2а} < 1,468$, 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.

Формирование топливного слоя по методу FST. Одним из важнейших аспектов деятельности явилось проведение сравнительных расчётов по времени формирования топливного льда как в однослойной полимерной оболочке ВТ-2, так в двухслойной пористой оболочке ВТ-2а. При этом рассматриваются оба вида топлива: дейтерий (D_2) и дейтерий-тритиевая смесь (DT). Для расчёта времени FST-формирования необходимо знание следующих параметров мишени:

- прочностные свойства оболочки: модуль Юнга для расчёта геометрического пятна контакта, а также прочность оболочки на растяжение для расчёта температуры разгерметизации и начальной температуры входа мишени в канал формирования;
- теплофизические свойства оболочки — теплопроводность и теплоёмкость для расчёта теплового пятна контакта и времени остывания оболочки;
- теплофизические свойства топлива для расчёта времени формирования слоя.

В рамках проекта HiPER [7] рассматриваются три различных материала оболочки: полиимид, полистирол и GDP-полимер. Однако необходимый набор параметров имеется только для полистирола (табличные данные по теплопроводности и теплоёмкости [15] и собственные данные по измерению прочности оболочки при комнатной и криогенных температурах [21]). Поэтому при расчёте времени формирования ограничимся рассмотрением пары «оболочка—топливо» в виде «полистирол—дейтерий» и «полистирол—DT-смесь».

На основании полученных данных по расчёту эффективного пятна контакта проведена оптимизация программы Rapid FST [22—24]. Определено значение оптимальной температуры входа мишени в канал формирования, рассчитано полное время формирования мишеней и определена длительность каждой отдельной стадии. При проведении расчётов использовалось программное обеспечение COMSOL Multiphysics для решения уравнений в частных производных, как стационарных, так и зависящих от времени. Расчёты выполнены для случаев D_2 - и DT-топлива. При этом прежде всего были определены следующие величины: 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.

Полученные результаты представлены в табл. 7 для ВТ-2 и в табл. 8 для ВТ-2а, где также указаны величины ρ_f (мг/см³) и P_f (атм.) — исходные плотность и давление газообразного топлива в оболочке при

Рис. 9. Динамика газовой полости при понижении температуры мишени: $\theta = 1,237$, $\rho = 86,4$ мг/см³ (■); $\theta = 1,468$, $\rho = 102,5$ мг/см³ (▲)

$T = 300$ К, необходимые для формирования твёрдого слоя заданной толщины при $T_{\text{тр}}$. Данные по геометрии мишеней ВТ-2 и ВТ-2а, использованные в этих расчётах, даны в табл. 3 и 4.

Т а б л и ц а 7. Параметры топливного слоя мишени ВТ-2

Топливо	V_{cl}	m_{cl}	V_v	m_v	ρ_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

Т а б л и ц а 8. Параметры топливного слоя мишени ВТ-2а

Параметр	D ₂	DT
Масса топлива, мкг, в том числе:	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

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 охлаждения мишени до $T_{\text{cool}} = 16,3$ К, поскольку плотность пара в полости мишени должна составлять 0,1 мг/см³ [7].

Выпишем данные для однослойных оболочек типа ВТ-2, подчёркивая 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 0,1 мг/см³ (при температуре ниже тройной точки $16,3 \text{ К} < T_{\text{тр}}$);

плотность твёрдого DT 253 мг/см³;

— однослойная оболочка, заполненная D₂-топливом:

внешний радиус D₂-слоя 1,044 мм;

внутренний радиус D₂-слоя 0,833 мм;

плотность пара 0,448 мг/см³ (при температуре тройной точки $18,7 \text{ К} = T_{\text{тр}}$);

плотность твёрдого D₂ 196,697 мг/см³.

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

— первая стадия — охлаждение мишени от температуры T_{in} до температуры $T_{\text{тр}}$ (τ_{liquid});

— вторая стадия — вымораживание слоя при температуре тройной точки $T_{\text{тр}}$ (τ_{solid});

— третья стадия — охлаждение мишени от температуры тройной точки $T_{\text{тр}}$ 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:

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

Результаты расчётов представлены в табл. 9—12, для которых необходимо сделать следующие комментарии:

Т а б л и ц а 9. Время формирования мишени ВТ-2 (полистирол—дейтерий)

ВТ-2	$\tau_{\text{liquid}}, T_{\text{in}} = 31 \text{ К}$	$\tau_{\text{solid}}, T_{\text{тр}} = 18,7 \text{ К}$	τ_{form}
Первая стадия	6,04 с		
Вторая стадия		3,97 с	10,01 с
Третья стадия	Отсутствует — нет требований на плотность пара в полости мишени		
ВТ-2	$\tau_{\text{liquid}}, T_{\text{in}} = 37 \text{ К}$	$\tau_{\text{solid}}, T_{\text{тр}} = 18,7 \text{ К}$	τ_{form}
Первая стадия	9,8 с		
Вторая стадия		3,97 с	13,77 с
Третья стадия	Отсутствует — нет требований на плотность пара в полости мишени		

Т а б л и ц а 10. Время формирования мишени ВТ-2 (полистирол—DT-смесь)

ВТ-2	$\tau_{\text{solid}}, T_{\text{ip}} = 19,7 \text{ К}$	$\tau_{\text{cool}}, T_{\text{cool}} = 16,3 \text{ К}$	τ_{form}
Первая стадия	Отсутствуют данные по теплопроводности DT в диапазоне $T = 39—20 \text{ К}$		
Вторая стадия	4,38 с		
Третья стадия	1,42 с		
	6,8 с		

Т а б л и ц а 11. Время формирования мишени ВТ-2а (полистирол—дейтерий)

ВТ-2а	$\tau_{\text{liquid}}, T_{\text{in}} = 31 \text{ К}$	$\tau_{\text{solid}}, T_{\text{ip}} = 18,7 \text{ К}$	τ_{form}
Первая стадия	4,3 с		
Вторая стадия	2,73 с		
Третья стадия	Отсутствует — нет требований на плотность пара в полости мишени		
ВТ-2а	$\tau_{\text{liquid}}, T_{\text{in}} = 37 \text{ К}$	$\tau_{\text{solid}}, T_{\text{ip}} = 18,7 \text{ К}$	τ_{form}
Первая стадия	6,95 с		
Вторая стадия	2,73 с		
Третья стадия	Отсутствует — нет требований на плотность пара в полости мишени		
	9,68 с		

Т а б л и ц а 12. Время формирования мишени ВТ-2а (полистирол—DT-смесь)

ВТ-2а	$\tau_{\text{solid}}, T_{\text{ip}} = 19,7 \text{ К}$	$\tau_{\text{cool}}, T_{\text{cool}} = 16,3 \text{ К}$	τ_{form}
Первая стадия	Отсутствуют данные по теплопроводности DT в диапазоне $T = 39—20 \text{ К}$		
Вторая стадия	2,57 с		
Третья стадия	0,84 с		
	3,41 с		

— мы уже отмечали, что в литературе отсутствуют данные по теплопроводности DT-смеси в диапазоне температуры 39—20 К. Однако, как было показано для мишеней класса OMEGA, для DT оценки дают время больше, но все же близкое по времени формирования к дейтерию: $\tau_{\text{form}} = 4,8 \text{ с}$ (D_2) и $\tau_{\text{form}} = 5,34 \text{ с}$ (DT). Это может служить некоторым ориентиром при прогнозировании результатов относительно DT-топлива для мишеней класса HiPER;

— кроме того, при расчёте времени формирования для мишени ВТ-2а существуют особенности, обусловленные дизайном самой мишени: наличие слоя «полимерная пена + DT» (см. далее);

— есть ещё один фактор, который нельзя не учитывать. Это влияние дополнительного источника нагрева (собственный бета-распад трития) на время формирования мишени (см. далее);

— в случае D_2 -топлива расчёты проводились для двух значений $T_{\text{in}} = 31$ и 37 К. Реализация значения 37 К возможна только при использовании более прочных оболочек, чем полистирол. Отметим, что переход на такие оболочки представляет значительный интерес для будущих исследований, так как позволит обеспечить максимальное время для симметризации криогенного слоя топлива.

Формирование слоя в мишени класса HiPER с оболочкой из двух слоёв: внешнего компактного полимерного слоя и внутреннего пористого полимерного слоя. Данный раздел начнём с конструктивных особенностей оболочки типа ВТ-2а, 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 полагается равным 0,1, концентрация пор ~80%. Внешний (компактный) и внутренний (пористый) слои оболочки ВТ-2а не связаны (не склеены) друг с другом.

При расчёте времени формирования мишени мы должны убедиться, что эффективная теплопроводность слоя «полимерная пена + DT(или D_2)» уменьшается незначительно. При этом учтём, что теплопроводность изотопов водорода для любых фазовых состояний значительно больше теплопроводности полистирола [13—15]. Учтём также и то, что мишень при её движении по каналу формирования вращается и топливо внутри оболочки перемешивается.

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

$$k_{\text{эф}} = k_f \frac{1 - \varepsilon\phi}{1 + \varepsilon\phi}; \quad \varepsilon = \frac{k_f - k_p}{k_f + k_p}.$$

Здесь k_f и k_p — теплопроводность топлива и полистирола соответственно; φ — концентрация полистирола. Для значений параметров $k_p/k_f = 0,1$ и $\varphi = 0,2$ получим $k_{эф}/k_f = 0,72$.

Оценка эффективной теплопроводности может быть проведена и более аккуратно, если учесть возможную форму включений. Известно, что поры открыты, имеют диаметр от 1 до 10 мкм 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 для эффективной теплопроводности. Локальный компонент $k_{эф}$ в направлении оси цилиндра определяется как

$$\frac{k_{эф}}{k_f} = 1 + \varphi \frac{k_p - k_f}{k_f}.$$

А в перпендикулярном направлении может быть записан в виде

$$\frac{k_{эф\perp}}{k_f} = 1 + \frac{2\varphi}{\frac{k_p + k_f}{k_p - k_f} - \varphi}.$$

В случае произвольно ориентированных цилиндров усреднённое значение определяется из выражения

$$\frac{k_{эф}}{k_f} = 1 + \varphi \left(\frac{1}{3} \frac{k_p - k_f}{k_f} + \frac{2}{3} \frac{2}{\frac{k_p + k_f}{k_p - k_f} - \varphi} \right).$$

Рассматривая те же значения параметров $k_p/k_f = 0,1$ и $\varphi = 0,2$, для эффективной теплопроводности получим $k_{эф}/k_f = 0,72$. Мы видим, что оба предположения для конфигурации пор (произвольная и цилиндрическая форма) дают близкие значения и показывают, что условие $k_{эф} \gg k_p$ по-прежнему выполняется. Другими словами, модель, в которой пренебрегается распределением температуры в топливном слое, может быть использована для расчёта времени формирования при наличии пористого слоя (мишень ВТ-2а, см. табл. 11 и 12).

Таким образом, анализ сравнительных расчётов по времени вымораживания топливного льда как в однослойной полимерной оболочке ВТ-2, так и в двухслойной пористой оболочке ВТ-2а показал возможность формирования мишеней данного класса методом FST за время, которое не превосходит 15 с даже для температуры $T_{in} = 37$ К (см. табл. 9 и 11). При этом, конечно, необходимо, чтобы время качения мишени (время пребывания мишени в КФ) было больше, нежели время формирования слоя, т.е. $\tau_{form} \leq \tau_{res}$. Результаты, полученные в работах [8, 9] для спиральной геометрии канала, показали, что величина τ_{res} может достигать ~25 с, что гарантирует выполнение требования по соотношению времени.

Еще один вывод. При сравнении данных для двух типов мишени (ВТ-2 и ВТ-2а), 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 определяются по-прежнему характерными параметрами первой оболочки из компактного полимера. Таким образом, наличие пористого слоя в оболочке не оказывает существенного влияния на время охлаждения мишени, но его наличие в дизайне мишени, безусловно, перспективно, поскольку упрощает достижение требуемой симметризации жидкого криогенного топлива.

Влияние дополнительного источника нагрева (собственный бета-распад трития) на время формирования мишени. При охлаждении мишени существует постоянный источник её нагрева — собственный бета-распад трития, содержащегося в составе ДТ-смеси. Период полураспада $T_{1/2} = 12,33$ года, максимальная энергия 18,61 кэВ, средняя энергия 5,54 кэВ [13, 14]. Оценим его влияние на результаты, представленные в табл. 10 и 12.

Закон радиоактивного превращения весьма прост. Для каждого радиоактивного ядра имеется определённая вероятность λ того, что оно испытывает превращение в единицу времени. Следовательно, если

радиоактивное вещество содержит N атомов, то количество атомов dN , которые претерпят 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 периодом полураспада $T_{1/2}$:

$$\lambda = \ln 2 / T_{1/2} \sim 0,69 / T_{1/2}.$$

С учётом этого уравнение распада 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, время FST-формирования составляет 10 с (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 равна $P_\beta = ((N_0 \ln 2) / T_{1/2}) E_{\text{decay}}$, где E_{decay} — энергия распада. Величину P_β можно сравнить с мощностью оттока тепла за счёт контакта мишени с холодными стенками канала формирования Q_{out} . Для мишеней ВТ-2 и ВТ-2а и DT-топлива (состав равновесной топливной смеси: 50% молекул DT, 25% трития и 25% дейтерия) величина отношения P_β / Q_{out} приведена в табл. 13.

Т а б л и ц а 13. Влияние бета-распада трития на время формирования мишени методом FST [8]

Мишень	P_β , мкВт	Q_{out} , мкВт	P_β / Q_{out}
ВТ-2	110	5850	0,018
ВТ-2а	70	5620	0,012

Подчеркнём, что при проведении оценок мы исходили из того, что поглощается всё выделяющееся тепло (реальное поглощение, безусловно, меньше). Поэтому полученная в этих предположениях величина $P_\beta / Q_{\text{out}} < 2\%$ означает, что рассматриваемый источник теплопритока может не учитываться при производстве мишеней по методу FST.

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 ТК. Подчеркнём, что в этом вопросе важным моментом является разработка физически состоятельного критерия потери устойчивости оболочки при действии осевого давления. В работах [8, 9] обсуждается вариант, когда имеется локальное и кратковременное превышение нагрузки в малой области внутреннего хрупкого криогенного слоя, окружённого внешним прочным слоем (полимерная оболочка). Этот внешний 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 [25] для очень тонких высоко-аспектных оболочек ($\Delta R \ll R$). Максимальная скорость, с которой тонкая полимерная оболочка может упасть на подложку и не разрушиться, определяется соотношением

$$V_{\text{lim}} = \frac{R^{2,5} \sigma^{1,5}}{2kE\Delta R \sqrt{m}}, \quad k = 1,2(1 - \kappa^2)^{-3/4},$$

где κ — коэффициент Пуассона; σ — предельное напряжение при растяжении, изгибе или сжатии. Проведём расчёты для высоко-аспектных оболочек типа ВТ-2 и ВТ-2а ($\Delta R = 3$ мкм, $R \sim 1$ мм). Данные для расчётов представлены в табл. 14 и 15. Сделаем оценки для наименьшего значения $\sigma = 30$ МПа и наибольшей массы мишени $m = 655$ мкг (ВТ-2а). Значение предельной скорости в этом случае составит $V_{\text{lim}} \sim 6,8$ м/с. Это в 2 раза превышает скорость свободного падения $V = 3,43$ м/с с высоты $H = 60$ см, соответствующей высоте МФ для мишеней класса HiPER (табл. 16). Учитывая, что в эксперименте при формировании слоя мишень лишь катится вдоль спирального КФ, то скорость её инъекции в ТК будет даже меньше величины 3 м/с, а это значит, что мишень будет устойчива к перегрузкам в процессе удара ($V_{\text{lim}} \sim 6,8$ м/с).

Т а б л и ц а 14. Параметры ВТ-2 и ВТ-2а

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 ВТ-2а (DT—полистирол)	
Масса мишени, мкг	654,66
Масса оболочки, мкг	166,08
Масса компактного полимера, мкг	41,28
Масса пористого полимера, мкг	124,79
Масса топлива, мкг, в том числе:	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

Т а б л и ц а 15. Свойства полистирола [15]

Разрушающее напряжение	МПа
Растяжение	30—40
Изгиб	55—70
Сжатие	80—100

Т а б л и ц а 16. Допустимая скорость мишени

Тип оболочки класса HiPER	ВТ-2а, полистирол (расчёт)	Оболочка PAMS (эксп.)
Аспектное отношение	349	46,5
ΔR , мкм	3	20
V_{lim} м/с	6,8	3,43*

*Скорость падения оболочки с высоты 60 см, которая соответствует высоте МФ.

Для более толстых оболочек деформации могут иметь иной характер [21] и величина V_{lim} будет порядка нескольких м/с, что и соответствует экспериментальным результатам с оболочками из материала poly-alpha-methyl-styrene (PAMS) с толщиной стенки $\Delta R = 20$ мкм (табл. 16). Такие оболочки в количестве 100 штук были поставлены Советом научно-технических ресурсов (Великобритания) [7] в рамках проекта МНТЦ № 3927 для проведения контрольной серии экспериментов [8, 9].

Таким образом, проведённые 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 экспериментами по устойчивости оболочек PAMS при действии осевого давления, возникающего при их инъекции в тестовую камеру [8, 9, 19]. Исследования проведены в виде серии тестовых пробросов (по пять оболочек в партии) с высоты 60 см, соответствующей высоте МФ, в котором использовался широкий цилиндрический КФ.

Модуль формирования для мишеней класса HiPER. В ФИАН [8, 9, 26] впервые разработана концепция МФ типа FST-МФ-HiPER, работающего в частотном режиме по принципу FST и позволяющего формировать криогенный слой топлива (200 мкм) внутри движущихся бесподвесных оболочек диаметром $\varnothing \sim 2$ мм. Напомним, что геометрия КФ должна быть такова, чтобы время качения мишени (время пребывания в канале формирования τ_{res}) было больше, нежели расчётное время формирования мишени $\tau_{\text{form}} < 15$ с.

Поэтому в процессе проектирования детально изучался вопрос, касающийся оптимизации КФ в виде одиночной спирали. При проведении расчётов варьировались следующие параметры FST-эксперимента: толщина стенки оболочки и прочностные характеристики материала оболочки, коэффициенты трения-скольжения и качения (важно при выборе материала для стенок КФ), геометрия КФ (угол захода спирали, её общая длина, высота и диаметр), тепловой и инжекционный режимы FST-цикла. Показано, что величина τ_{res} может достигать ~ 25 с, что позволяет осуществлять широкий класс экспериментов с мишенями различного дизайна, реализуя их движение в одном и том же МФ (см. далее раздел «Мишени реакторного класса»).

В работах [8, 9, 26] также представлены результаты по эскизному проектированию модуля FST-МФ-HiPER, описана его функциональная схема и дан перечень основных и интерфейсных узлов. Подчеркнём, что базовые элементы модуля отработаны на прототипах, что позволяет снизить риски и уменьшить стоимость разработки при построении FST-МФ-HiPER.

Для демонстрации возможности формирования методом FST криогенного слоя топлива в мишенях класса HiPER (в однократном режиме) планируется использовать 100-проекционный видеотомограф, разработанный и созданный в ФИАН [27]. Для демонстрации работы модуля FST-МФ-HiPER в частотном режиме предполагается контролировать качество криогенного слоя в реальном времени. Возможные подходы к решению этой задачи основаны на применении фурье-голографии и пороговой характеристики мишеней [16].

На рис. 10 показаны макеты КФ, представляющие собой двойную спираль [28], для проведения FST-экспериментов с мишенями двухмиллиметрового диаметра и более, включая и мишени реакторного класса. Такие КФ могут использоваться в конструкции FST-МФ-HiPER.

Рис. 10. Макеты каналов формирования мишеней для проведения FST-экспериментов с мишенями $\varnothing \geq 2$ мм. Параметры каналов: Ω — число витков; L , X — длина спирали и хвостовиков; l — ширина двойной спирали; № 2: медная трубка ($\varnothing 6 \times 1$ мм), $\Omega = 23,5$, $\varnothing$ спирали 36 мм, $l = 72$ мм, $L = 360$ мм, $X_1 = 70$ мм, $X_2 = 95$ мм; № 3: медная трубка ($\varnothing 6 \times 1$ мм), $\Omega = 22$, $\varnothing$ спирали 39 мм, $l = 78$ мм; $L = 440$ мм, $X_1 = 100$ мм, $X_2 = 83$ мм

Таким образом, в результате проведённых исследований был приобретён уникальный опыт по разработке и проектированию одного из основных элементов фабрики мишеней — МФ, предназначенного для непрерывного пополнения топливом экспериментов на мощных лазерных установках. Этот опыт будет использован при конструировании аналогичного устройства, но уже следующего поколения — прототипа фабрики мишеней реакторного класса.

Резюме. В работе представлены результаты экспертного анализа, выполненного в ФИАН для мишеней класса HiPER. Напомним, что целью проекта HiPER является построение пилотного образца МФ для лазерной установки, работающей в частотном режиме облучения криогенных топливных мишеней ($E_L \sim 200$ кДж, $\nu \geq 1$ Гц) [7]. Именно поэтому в процессе анализа мы учитывали возможность работы МФ не только как автономного устройства, но и как интегральной части установки по производству мишеней, их сборке со специальным носителем — саботом, а также инжекционной доставке готовых мишеней в лазерный фокус. Это позволило создать конструкцию FST-МФ-HiPER в виде модуля, совместимого с устройством высокочастотной сборки 100 ансамблей типа «криогенная мишень + сабот» и подачи этих сборочных единиц на стартовую позицию в инжектор.

Наиболее важный аспект проведённых исследований — создание вычислительного кода Target Production Scheme Code (TPS-код) для проведения оптимизационных расчётов замкнутого цикла FST-формирования: заполнение оболочек топливом — формирование криогенного слоя — инжекция готовой мишени. Данные TPS-кода позволяют осуществить конструирование модуля FST-МФ-HiPER и планирование экспериментов при требуемой вариации условий.

При проведении расчётов использовались следующие входные параметры: начальная конфигурация мишеней класса HiPER, сводная информация по свойствам материалов, тепловой режим FST-цикла, инжекционный режим FST-цикла.

Основной результат данной деятельности (табл. 17) — расчёт оптимизационных параметров (ОП) FST-цикла для специализированного модуля высокочастотного формирования криогенных топливных мишеней класса HiPER.

Т а б л и ц а 17. Оптимизационные параметры FST-цикла для мишеней BT-2 и BT-2a

Оптимизационные параметры для разработки технических требований на модуль FST-МФ-HiPER	BT-2 (D ₂ —полистирол)	BT-2a (D ₂ —полистирол)
Требуемая плотность заполнения, мг/см ³	97,01	86,82
Требуемое давление заполнения при 300 К, атм.	986,15	811,50
Допустимый перепад давления на стенке оболочки, атм.	0,29	0,31
Время заполнения, ч	34,80	35,94
Скорость заполнения, атм./мин	0,24—0,8	0,2—0,6
Температура начала разделения топлива на жидкую и газообразную фазы T_s , К	37,4	~38
Температура разгерметизации T_d , К	31,1	31,5
Давление топлива внутри мишени при T_d , атм.	5,35 (давление разрушения ~5,7)	5,84 (давление разрушения ~5,9)
Температура T_{in} входа мишени в КФ, К	31,0	31,0
Давление топлива внутри мишени при T_{in} , атм.	5,34	5,34
Время формирования, с	10,01	7,03
Геометрия КФ	Угол захода спирали 5,7°, её длина 55 см, высота 5,51 м	
Время пребывания мишени в КФ, с		
	$\tau_{res} \sim 25$	

Результаты моделирования показывают перспективность применения FST-технологий и, по сути, представляют собой те искомые практические рекомендации, которые обеспечивают оптимальные режимы работы всех стадий производства мишеней:

— стадия заполнения: реализуются режимы, при которых время заполнения оболочки минимально, возможность её 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 температуре;

— стадия формирования: анализ сравнительных расчётов по времени формирования топливного льда как в однослойной полимерной оболочке BT-2, так в двухслойной пористой оболочке BT-2a показал возможность производства мишеней данного класса методом FST, причём время формирования не превосходит 15 с как для D₂-, так и DT-топлива;

— стадия доставки: экспериментальные и расчётные данные подтверждают высокую устойчивость при инжекционном транспорте бесподвесных мишеней класса HiPER между основными функциональными элементами МФ: МК—КФ—ТК.

МИШЕНИ РЕАКТОРНОГО КЛАССА

Формирование и доставка криогенных мишеней с высокой частотой являются неперенными условиями построения фабрики топливных мишеней [1] для обеспечения работы реактора по схеме ИТС. Ключевыми моментами при построении фабрики являются переход к реакторным поточным технологиям, основанный на выборе эффективного метода формирования топливного слоя, и построение соответствующего устройства для частотного производства мишеней. В данном разделе представлены результаты экспертного анализа, показывающие возможность применения метода FST в качестве научной и технологической базы для решения поставленной задачи применительно к криогенным мишеням реакторного класса.

Классические реакторные мишени с высоким энергетическим выходом. В настоящее время не существует общепринятого дизайна для мишеней реакторного класса. Поэтому начальной точкой нашего исследования будет дизайн, относящийся к классической мишени с высоким энергетическим выходом, или Classical High Gain Target (CHGT). Данная мишень представляет собой сферически симметричный слой DT/D₂-топлива, замороженный на внутренней поверхности полимерной оболочки. Мы рассмотрим конфигурацию CHGT-1, предложенную в работе [29]. Она представляет собой оболочку из полистирола диаметром 4 мм и толщиной стенки 45 мкм. Толщина твёрдого слоя топлива в тройной точке составляет 200 мкм.

Параметры газообразного топлива в мишени при $T = 300$ К даны в табл. 18.

Т а б л и ц а 18. Параметры мишени CHGT-1 при комнатной температуре

Топливо	Плотность заполнения, мг/см ³	Давление заполнения, атм.	Время заполнения, ч	Скорость заполнения, атм./мин	Масса топлива, 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

В двухфазной области, т.е. уже при криогенных температурах $T < T_s$ (T_s — температура начала разделения на жидкую и газообразную фазу) соотношения между массой газа (насыщенный пар, m_{vapor}) и массой жидкости (m_{liquid}) определяются как [22—24]

$$\frac{m_{\text{liquid}}}{M_f} = \frac{\rho_{\text{liquid}}}{\rho_f} (1 - \alpha^3); \quad \frac{m_{\text{vapor}}}{M_f} = \frac{\rho_{\text{vapor}}}{\rho_f} \alpha^3;$$

$$\alpha(\rho_f, T) = \frac{\rho_{\text{liquid}} - \rho_f^{1/3}}{\rho_{\text{liquid}} - \rho_{\text{vapor}}^{1/3}} = \frac{\rho_{\text{liquid}} - \theta \rho_{\text{cp}}^{1/3}}{\rho_{\text{liquid}} - \rho_{\text{vapor}}^{1/3}}; \quad \theta = \frac{\rho_f}{\rho_{\text{cp}}}.$$

Здесь T — температура топливного вещества в момент времени t , плотности фаз $\rho_{\text{vapor}}(T)$ и $\rho_{\text{liquid}}(T)$ известны из фазовой диаграммы [13, 14]. Из этих соотношений легко получить ряд полезных формул для описания процесса охлаждения мишени:

$$\frac{R_{\text{vapor}}(T)}{R_0} = \alpha(T); \quad W_{\text{liquid}}(T) = R_0(1 - \alpha(T)); \quad \frac{V_{\text{liquid}}(T)}{V_0} = 1 - \alpha^3(T),$$

где R_{vapor} — радиус газовой полости; $W_{\text{cl}} = W_{\text{liquid}}$ — толщина слоя конденсированной фазы топлива; V_{liquid} — её объём при температуре мишени T .

Отметим, что температура начала формирования T_{in} может лежать между T_s и T_{tp} , т.е. внутри оболочки уже имеется некоторое количество жидкой фазы. При достижении температуры T_{tp} происходит формирование твёрдой фазы топлива. Её параметры определяются теми же соотношениями с очевидной заменой нижнего индекса «liquid» на индекс «solid».

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 её движении в камере реактора с тёплыми стенками, чтобы снизить тепловой поток, поглощаемый в материале мишени. Для этого мы сделали предварительные расчёты

Рис. 11. Время охлаждения различных металлических покрытий: палладий (♦); золото (■); медь (▲); железо (●); CHGT-1: $\varnothing = 4$ мм, $W = 200$ мкм; CHGT-2: $\varnothing = 6$ мм, $W = 300$ мкм

времени охлаждения различных металлических покрытий (рис. 11). Это время оказалось крайне небольшим — менее 1 мкс. Вывод напрашивается сам собой: охлаждаясь практически мгновенно, тонкий металлический слой (150—200 Å) приводит к значительному расплыванию теплового пятна контакта и, как следствие, к уменьшению времени формирования твёрдого слоя топлива на внутренней поверхности оболочки.

Все расчёты выполнены с использованием TPS-кода, полученные результаты приведены в табл. 19. Для сравнения в последней строке таблицы дано время формирования мишени, когда площадь пятна контакта полностью совпадает с площадью поверхности оболочки ($\chi_{эф} = 1$). Это минимально возможное время вымораживания слоя. Но при этом надо помнить, что при столь малом

времени вряд ли удастся осуществить симметризацию топливного слоя.

Т а б л и ц а 19. Время FST-формирования для мишеней класса CHGT-1

D_2 -топливо, $\rho = 54,7$ мг/см ³ , $P_f = 415,1$ атм.	Время формирования, с	
	$T_{in} = 37$ К	$T_{in} = 27$ К
$\chi_{эф} = 1,8 \cdot 10^{-3}$ (только СН-оболочка)	227,5	149,0
$\chi_{эф} = 3,0 \cdot 10^{-2}$ (СН-оболочка + металлическое покрытие)	13,65	8,94
$\chi_{эф} = 1,0$	0,38	0,24

Таким образом, расчёты показывают, что время формирования мишени CHGT-1 с внешним металлическим покрытием не превышает 15 с (см. табл. 19). Это означает, что МФ, разработанный для мишеней класса HiPER (FST-МФ-HiPER), вполне может использоваться для начальных экспериментов по формированию реакторных мишеней класса CHGT-1.

Отметим, что технология нанесения внешних защитных слоёв хорошо развита в ФИАН [21]. На рис. 12 представлена криогенная мишень с внешним покрытием платина/палладий с параметрами: отражающий слой 200 Å Pt/Pd, диаметр полимерной оболочки 1,5 мм, состав топлива $D_2 + 3\%Ne$, толщина криогенного слоя 50 мкм. При этом внешний защитный слой позволяет реализовать требуемую скорость охлаждения мишени при её формировании методом FST [11, 30], защитить мишень от теплового излучения при её доставке в лазерный фокус (напомним, что температура стенок камеры реактора SOMBRERO составляет 1758 К [31]).

Рис. 12. Мишень с покрытием

Критическая мишень с твёрдым ультрадисперсным слоем топлива. В данном разделе мы рассмотрим особенности формирования реакторных мишеней в случае, когда плотность топлива при заполнении оболочки равна плотности в критической точке $\rho_f = \rho_{cr}$ (табл. 20).

Т а б л и ц а 20. Критические параметры для изотопов водорода [13, 14]

Параметр	H ₂	D ₂	T ₂	DT-смесь
ρ_{cr} , мг/см ³	30,1	69,8	108,97	87,06
P_{cr} , атм.	12,98	16,43	18,26	17,5
T_{cr} , К	33,19	38,34	40,44	39,42

В экспериментах по формированию слоя в ультрадисперсном состоянии была обнаружена корреляция между эффектом образования прозрачного слоя и протеканием процесса капельной конденсации в объёме оболочки, когда плотность ρ_f близка к ρ_{cr} для заданного топливного вещества. Это обстоятельство имеет особое значение для реакторной мишени класса CHGT-1, поскольку в этом случае значения плотности топлива

при заполнении оболочки находятся вблизи критических значений, что следует из простого сравнения табл. 18 и 20.

Чтобы упростить дальнейший анализ, снова воспользуемся параметром θ . Для критической мишени $\rho_f = \rho_{cr}$ и, следовательно, $\theta = 1$. Подчеркнём, что процессы, протекающие в критической точке, обладают определённым гистерезисом и могут наблюдаться также и вблизи критической точки при $\theta \sim 1$ (так называемая околоскритическая мишень). Например, рис. 13 ($\theta = 0,91$, $\rho_f = 27,39 \text{ мг/см}^3$) и рис. 14 ($\theta = 0,93$, $\rho_f = 27,99 \text{ мг/см}^3$) с очевидностью демонстрируют возникновение критической опалесценции при $\theta < 1$ (кадр 2).

Критическая опалесценция

Рис. 13. Капельная конденсация в объёме оболочки при её охлаждении со скоростью $q = 0,18 \text{ К/с}$ ($P_f = 445 \text{ атм.}$ при 300 К , $\rho_f = 27,39 \text{ мг/см}^3$, $\theta = 0,91$)

Теперь перейдём к более детальному рассмотрению экспериментов по охлаждению оболочки с водородом, представленных на рис. 13. Нас будет интересовать поведение границы раздела «жидкость—пар» при $\theta \sim 1$, когда внутри оболочки реализуется процесс капельной конденсации в объёме. Оболочка из полистирола ($\varnothing 940 \text{ мкм}$) была заполнена H_2 при $T = 300 \text{ К}$ до давления $P_f = 445 \text{ атм.}$ Плотность H_2 близка к критической. Изохора формирования соответствует $\theta = 0,91$. Начальное фазовое состояние — газ (кадр 1). В экспериментах точность измерения температуры составляла $0,05 \text{ К}$. Отметим, что использование в этих экспериментах именно водорода обусловлено следующими факторами: изучаемые явления не зависят от вида изотопа, время заполнения оболочек водородом наименьшее по сравнению с другими изотопами, водород — наиболее дешёвый изотоп.

По мере быстрого охлаждения оболочки ($q = 0,18 \text{ К/с}$) при переходе через критическую точку наблюдается явление капельной конденсации в объёме (причём с элементами критических явлений). Хорошо видны критическая опалесценция (кадр 2) и последующее образование крупных пузырьков пара за счёт слияния малых (кадр 3). Граница раздела фаз становится распределённой по всему объёму и не имеет чёткой формы и локализации в пространстве (мениск отсутствует, кадры 2 и 3).

Чтобы понять такое поведение водорода, остановимся на свойствах вещества при $\theta \sim 1$, т.е. при плотности $\rho_f \sim \rho_{cr}$. Переход между жидкостью и газом в критической точке относится к переходам высших порядков, т.е. переходам порядок—беспорядок, или критическим явлениям. Самое интересное в таких явлениях — 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 распределённой по всему объёму и не имеет чёткой формы и локализации в пространстве. Самое важное для нас заключается в том, что данный процесс облегчает условия формирования высокодисперсных гомогенных сред и, в частности,

Рис. 14. Капельная конденсация в объёме оболочки при её охлаждении со скоростью $q = 0,013 \text{ К/с}$ ($P_f = 462 \text{ атм.}$ при 300 К , $\rho_f = 27,99 \text{ мг/см}^3$, $\theta = 0,93$)

формирование высокодисперсного слоя топлива в присутствии примесей. На основе полученных экспериментальных результатов кратко сформулируем основные выводы:

- когда плотность топлива при заполнении оболочки близка к плотности в критической точке, то наличие капельной конденсации в объёме свидетельствует о том, что для данной плотности вещества требуемые скорости охлаждения достигнуты, т.е. реализованы условия для формирования твёрдого 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 интересующего нас процесса капельной конденсации в объёме оболочки (см. рис. 13 и 14);

- в случае, когда в веществе присутствуют легирующие добавки другого вещества с большей молекулярной массой (или мы имеем дело со смесью веществ — DT-топливом), флуктуации плотности оказываются больше и процесс капельной конденсации происходит при меньших скоростях охлаждения (добавки служат центрами конденсации). Эта закономерность наблюдалась нами экспериментально на смесях $H_2 + HD$ и $D_2 + Ne$ (работа выполнена в рамках проекта МАГАТЭ № 13871) [2];

- кроме того, процесс капельной конденсации в объёме способствует равномерному распределению добавок по объёму жидкого слоя. Это особенно важно для DT-топлива, представляющего смесь нескольких компонентов — D_2 (25%), DT (25%) и T_2 (25%), в которой тритий есть легирующий элемент, а также альтернативного топлива с пониженным содержанием трития в смеси (20% и менее) [32—34]. При вымораживании слоя это позволяет стабилизировать метастабильную ультрадисперсную структуру слоя, получаемую при быстром охлаждении мишени, поскольку в равномерном поле добавок реализуются условия для инициации массового роста дислокаций по всему слою, препятствующих образованию крупнокристаллической фазы;

- ещё один фактор, который будет влиять на скорость охлаждения, — энергичное перемешивание топлива при качении мишени по КФ, которое усиливает процесс конвективного теплопереноса 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 слоёв топлива требуемого качества. Условия формирования — высокие скорости охлаждения ($q = 1—50$ К/с) и высокоплавкие добавки к топливу для стабилизации неравновесной фазы. При плотностях, близких к критической плотности, необходимые скорости охлаждения снижаются до величин порядка $q = 0,2—0,01$ К/с [11], что даёт определённую свободу при разработке технологии формирования реакторных мишеней с ультрадисперсным слоем.

Основные преимущества ультрадисперсного слоя перед крупнокристаллической фазой топлива можно сформулировать следующим образом: изотропность слоя — обеспечение требуемого качества поверхности слоя, а также повышенная механическая и тепловая устойчивость слоя при производстве и доставке мишеней; реализация высоких скоростей охлаждения при формировании слоя, малое время формирования, минимизация трития в мишенной системе; осуществление формирования слоя в движущихся мишенях, частотность производства, минимизация стоимости производства в расчёте на одну мишень, перспектива применения в реакторах ИТС.

Критическая мишень с топливом, находящимся в критическом состоянии. Если плотность топливного вещества внутри оболочки близка к критической, то существует ещё одна возможность получить принципиально новый тип мишени, который может использоваться в исследованиях по ИТС [11, 35]. В отличие от традиционной мишени, представляющей собой сферическую полимерную оболочку с твёрдым топливным слоем на её внутренней поверхности (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 [36]. Такие волны наблюдаются вблизи критической точки, где $(\partial^2 P / \partial p^2)_s < 0$ [37]. Это явление может быть использовано для организации требуемого профиля топлива внутри оболочечной мишени при её облучении лазерным импульсом специальной формы для достижения плазмой высокой температуры и плотности, необходимых для ини-

цирования реакций термоядерного синтеза. 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 о свойствах веществ, находящихся в экстремальных физических условиях (высокие плотность и температура, огромные электрические и магнитные поля).

Использование мишени с топливом в критическом состоянии естественно ставит вопрос о её формировании и доставке в фокус лазерной установки. Основная идея заключается в том, что первоначально топливо вымораживается на внутренней поверхности оболочки в виде твёрдого криогенного слоя, а затем мишень инжектируется в камеру взаимодействия с лазерным излучением. В процессе полёта в камере с тёплыми стенками топливо должно нагреться до критического состояния как раз в момент пролёта точки схождения лазерных лучей. Алгоритм формирования критической мишени включает следующие стадии (рис. 15):

Рис. 15. Алгоритм формирования критической мишени непосредственно в процессе её доставки в фокус лазерной установки: *а* — расчётная изохора формирования при нагреве мишени (пунктирная линия на PVT-диаграмме); *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, когда плотности жидкости и газа сравниваются)

— оболочки, расположенные в МК, заполняются топливом до критической плотности при комнатной температуре $T = 300$ K;

— МК с заполненными оболочками охлаждается до температуры разгерметизации T_d , чтобы удалить топливо, находящееся вне оболочек;

— дальнейшее охлаждение ниже T_p приводит к вымораживанию топлива внутри оболочки. Заметим, что при этом вовсе не требуется формировать высококачественные слои, как это делается в случае обычных криогенных мишеней. Структура топлива может быть любой, даже крупнокристаллической (рис. 15, *б*, кадр 1), а сами слои обладать сферической асимметрией и значительной шероховатостью поверхности;

— следующий шаг — инжекция мишени в камеру взаимодействия с лазерным излучением и её нагрев во время полёта: рис. 15, *а* — PVT-диаграмма процесса, рис. 15, *б* — экспериментальная реализация процесса. При нагреве мишени топливо переходит в критическое состояние с параметрами ρ_{cr} , P_{cr} и T_{cr} (плоский мениск на рис. 15, *б*, кадр 4).

Следует отметить ещё одну важную деталь. Крайне перспективным является использование в дизайне критических мишеней защитных металлических покрытий. Это позволит контролировать температуру мишени в процессе её нагрева при транспорте мишени в реакторной камере с теплыми стенками [11]. В настоящее время для реализации этого подхода в ФИАН разрабатывается специальный вычислительный код, позволяющий определять временной промежуток, необходимый для нагрева топлива в мишени до критического состояния непосредственно к моменту прихода основного лазерного импульса.

Резюме. В работе детально рассмотрены особенности FST-формирования криогенных мишеней прямого сжатия, начиная от дизайна мишеней для установки OMEGA до мишеней реакторного класса (CHGT-1). Результаты, представленные в табл. 21, свидетельствуют о возможности создания на базе FST-МФ-HiPER универсального модуля FST-формирования с набором КФ различной геометрии для проведения экспериментов с мишенями, предназначенными для лазерных термоядерных установок с разным энергетическим уровнем.

Т а б л и ц а 21. Сводные данные по времени FST-формирования для мишеней различного дизайна

OMEGA, $E_L = 30$ кДж			NIF, $E_L = 1,5$ МДж		
Параметры мишени		Время формирования	Параметры мишени		Время формирования
R , мкм	460	4,8 с ($T_{in} = 37$ К)	R , мкм	1690	30,9 с ($T_{in} = 37$ К)
ΔR , мкм	3		ΔR , мкм	3	
W , мкм	100		W , мкм	340	
HiPER, $E_L \sim 200$ кДж ($v \geq 1$ Гц)					
Параметры мишени (BT-2)		Время формирования	Параметры мишени (BT-2a)		Время формирования
R , мкм	1047	13,8 с ($T_{in} = 37$ К)	R , мкм	1023	9,7 с ($T_{in} = 37$ К)
ΔR , мкм	3		ΔR , мкм	3	
W , мкм	211		W , мкм	120	
W_{porous}	—		W_{porous} , мкм	70	
Реакторная мишень (CHGT-1), $v \sim 10$ Гц					
Параметры мишени		Площадь эффективного пятна контакта $\chi_{эф}$		Время формирования	
R , мкм	2000	$\chi_{эф} = 3,0 \cdot 10^{-2}$ (CH-оболочка + металлическое покрытие)		13,65 с ($T_{in} = 37$ К)	8,94 с ($T_{in} = 27$ К)
ΔR , мкм	45				
W , мкм	200				

Примечание: мишени класса OMEGA представляют собой «гидродинамический эквивалент», достаточно близкий к мишеням, предназначенным для демонстрации поджига на установке NIF (National Ignition Facility) [10].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результатом многолетней работы авторов явилось создание уникальной технологии FST-формирования топливного слоя в движущихся сферических оболочках. Наиболее важные характеристики FST-технологии представлены в табл. 22.

Т а б л и ц а 22. Перспективность применения FST-технологии в современной программе по ИТС

Заполнение				
Метод	Оболочки	Топливо	Давление	Диффузионная мода
Диффузия	Компактный и/или пористый полимер (возможны иные варианты)	H_2 , D_2 DT-смесь Добавки к топливу	~ 1000 атм. при 300 К	1. Атомарная мода (катализатор — платина) 2. Молекулярная мода
Формирование				
Начальное состояние топлива	Скорость охлаждения и добавки	Время формирования	Частота формирования	Время жизни по шкале температур
Газообразное, критическое, жидкое, двухфазное — жидкость + пар	$q = 1\text{—}50$ К/с и $\eta = 0,5\text{—}20\%$	$\tau_{form} < 15$ с для D_2 и DT-смеси	Текущее значение $\nu = 0,1$ Гц	$4,2 \text{ К} \leq \Delta T < T_p$, где T_p — температура тройной точки

Примечание: q — скорость охлаждения (необходимы высокие скорости охлаждения для получения ультрадисперсных криогенных слоев, обладающих повышенной механической и тепловой устойчивостью под действием внешних перегрузок, возникающих при доставке мишени в лазерный фокус); η — % содержания высокоплавких добавок к топливу (такие добавки необходимы для стабилизации ультрадисперсной структуры слоя); τ_{form} — время формирования слоя (малое время формирования позволяет минимизировать запасы трения в мишениной системе); ΔT — температурный интервал устойчивого существования ультрадисперсной структуры слоя (для FST-технологии этот интервал максимально возможный — от 4,2 К вплоть до начала плавления твердой фазы топлива в тройной точке).

Отметим, что данная технология применима не только для формирования сферических криогенных мишеней, но также и цилиндрических, необходимых для проведения экспериментов на установке ЛАПЛАС [38, 39].

Разработаны вычислительный TPS-код и соответствующий пакет прикладных программ для прогнозирования и анализа экспериментальных результатов по FST-формированию криогенных мишеней различного дизайна, включая и мишени реакторного класса.

Проведённый цикл теоретических и экспериментальных исследований показал, что перспективным путём решения проблемы частотного формирования и доставки дешёвых криогенных мишеней без разрушения является реализация FST-технологий, работающих по замкнутому циклу: заполнение—формирование—доставка. При этом могут использоваться различные виды топлива: дейтерий, DT-смесь в стандартной (эквимольарной) композиции или DT-смесь с пониженным содержанием трития в смеси [32—34]. Необходимо особо подчеркнуть, что структура топлива должна быть устойчивой к воздействию механических и тепловых нагрузок, возникающих при транспорте мишени в фокус лазерной установки, что может быть достигнуто за счёт FST-формирования ультрадисперсных слоёв с мелкозернистой или нанокристаллической структурой [11].

Подчеркнём, что на современном этапе применение именно FST-технологий позволяет впервые экспериментально осуществить массовое производство стандартных криогенных мишеней, а также провести исследования с мишенями альтернативного дизайна. Это так называемые критические мишени с примерно критической плотностью топлива и мишени с пониженным содержанием трития в DT-смеси [32—34]. Кроме того, применение FST-технологий перспективно ещё и с точки зрения снижения запасов трития в рабочей системе, что обусловлено минимизацией всех временных и пространственных масштабов на всех стадиях производства мишени. Прежде всего это связано с реализацией высоких скоростей охлаждения топлива в движущихся оболочках и, как следствие, с минимизацией времени FST-формирования криогенной мишени любого класса. Поэтому такой подход перспективен для построения фабрики мишеней и перехода к реакторным технологиям производства и доставки мишеней.

Подчеркнём также, что стоимость мишеней является основным фактором, который определяет экономику энергетической станции на базе ИТС [40]. Формирование слоя в движущихся оболочках, т.е. применение поточных FST-технологий, позволяет реализовать массовое производство криогенных топливных мишеней и обеспечить доступную цену за одну топливную единицу (мишень). Это имеет особое значение на фоне тех выводов, которые сделаны в отчете Комиссии США по разработке энергетических станций на основе ИТС [40]: «Требуется слишком большая экстраполяция, чтобы перейти от уровня уже существующих в США современных технологий к технологиям массового производства дешёвых мишеней».

Таким образом, 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. Дальнейшее развитие технологий на основе метода FST осуществляется в рамках программы по созданию модульного варианта фабрики мишеней реакторного класса и коммерциализации полученных результатов [41—44]. Работа с движущимися бесподвесными мишенями открывает возможность для развития принципиально новой энергоэффективной технологии производства экологически чистого топлива для выработки электрической и тепловой энергии по схеме ИТС. При этом подчеркнём, что эффективность работы термоядерной электростанции можно обеспечить на базе одновременного функционирования нескольких реакторов, а именно: один драйвер — одна фабрика мишеней — N реакторов ($N \geq 5$) [45]. А для этого необходимо, чтобы фабрика мишеней, поставляющая криогенное водородное топливо в реактор, осуществляла производство мишеней поточным, или, другими словами, «конвейерным» способом, что в настоящее время возможно только при реализации метода FST (рис. 16).

Рис. 16. Построение энергетической станции ИТС с числом реакторов $N \geq 5$ требует создания фабрики мишеней поточного типа, способной эффективно работать с N -количеством реакторов по следующей схеме: один драйвер — одна фабрика мишеней — N реакторов

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы благодарны всем участникам следующих научных проектов: контракт ФИАН — Лаборатория Резерфорда и Апплтона (Великобритания) (1989—1991); проект РФФИ № 06-08-01575-а (2006—2007); проекты МАГАТЭ № 11536 и № 13871 (2000—2009); контракт ФИАН — РФЯЦ ВНИИЭФ (Саров, РФ) (2005—2006); контракт ФИАН — GSI — коллаборация HEDgeNOV (Германия) (2007—2008); проекты МНТЦ № 512, № 1557, № 2814, № 3927 (1996—2011).

Ряд исследований проведён в рамках программы РАН совместно со специалистами из Отделения квантовой радиофизики им. Н.Г. Басова ФИАН, Нейтронно-физического и Криогенного отделов ФИАН (к.ф.-м.н. А.И. Никитенко, к.ф.-м.н. Т.П. Тимашева, к.ф.-м.н. А.И. Громов, С.М. Толоконников, Е.Л. Кошелев, В.М. Дороготовцев, А.А. Акунец и др.), Лаборатории сверхпроводимости ФИАН (д.ф.-м.н. К.В. Мицен, к.ф.-м.н. О.М. Иваненко, С.Ю. Гаврилкин), ВЦ РАН им. А.А. Дородницына (профессор А.А. Белолипецкий, к.ф.-м.н. Е.А. Малинина и др.), ФГУП «Красная Звезда» (к. техн. н. Г.Д. Баранов, к. техн. н. И.Д. Тимофеев, к. техн. н. А.И. Сафронов, В.И. Листратов, Г.С. Усачев и др.), МГУ (профессор Л.С. Ягужинский, к.ф.-м.н. А.А. Тоньшин), СПбГПУ (профессор В.Ю. Сергеев, к.ф.-м.н. Г.В. Капралов), ГНЦ РФ ВНИИНМ им. А.А. Бочвара (к.ф.-м.н. Н.Н. Рязанцева, Л.А. Ривкис), ООО «Криотрэйд» (А.В. Кутергин, М.П. Алексеев, М.В. Кленов), НИЦ «Курчатовский институт» (профессор Б.В. Кутеев) и Национального исследовательского технологического университета «МИСиС» (профессор Л.В. Панина).

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 (Россия).

В ряде экспериментов использовались полимерные сферические оболочки диаметром 1,8—2,2 мм, предоставленные ФИАН Лабораторией Резерфорда и Апплтона (Великобритания) и Лабораторией лазерной техники (Япония).

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. 38, issue 2, p. 75 (in Russian).
3. **Aleksandrova I.V., Koresheva E.R., Krokhin O.N., Osipov I.E.** Cryogenic hydrogen fuel for controlled inertial confinement fusion. FST-formation of cryogenic fuel layer in moving free-standing shells: theory and experiment. — VANT. Ser. Termoyadernyi sintez (Problems of Atomic Science and Technology. Ser. Thermonuclear Fusion), 2015, vol. 38, issue 3, p. 59 (in Russian).
4. **Meyers M.A., Mishra A., Benson D.J.** Mechanical properties of nanocrystalline materials. — Progress in Materials Science, 2006, vol. 51, p. 427.
5. **Kucheev S.O., Hamza A.V.** Condensed hydrogen for thermonuclear fusion. — J. Appl. Phys., 2010, vol. 108, p. 091101.
6. **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.
7. **Official site of HiPER programme:** <http://www.hiper-laser.org>.
8. **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.
9. **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.
10. **McCrory 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.
11. **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.
12. **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.
13. **Roder H.M., Childs G.E., McCarthy R.D., Angerhofer P.E.** Survey of the Properties of the Hydrogen Isotopes Below their Critical Temperature. — NBS Technical Note, Monograph 74, 1965.
14. **Souers P.C.** Hydrogen Properties for Fusion Energy. — Lawrence Livermore National Laboratory, University of California Press, 1986. 203 p.
15. **Database information library of ucla:** http://aries.ucsd.edu/pulsifer/props/mech_solid_hydrn.shtml.

16. **Aleksandrova I.V., Belolipetskiy A.A., Koresheva E.R. et al.** Cryogenic targets for reactor. Part II. Characterization of cryogenic targets: Preprint № 11 of P.N. Lebedev Physical Institute of the Russian Academy of Sciences, Moscow, 2013. 154 p. (in Russian).
17. **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. — J. Moscow Physics Soc., 1999, vol. 9, p. 325.
18. **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.
19. **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).
20. **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 of P.N. Lebedev Physical Institute of the Russian Academy of Sciences, Moscow, 2012. 134 p. (in Russian).
21. **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).
22. **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.
23. **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.
24. **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.
25. **Landau L.D., Lifshits E.M.** Theoretical physics. Vol. VII. Theory of elasticity. 4-th edition — M.: Nauka (Science), 1987. 248 p. (in Russian).
26. **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).
27. **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.
28. **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.
29. **Nakai S., Miley J.** Physics of High Power Laser and Matter Interactions. — Word Scientific Publishing, Singapore, 1992.
30. **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. — J. Physics D: Applied Physics, 2004, vol. 37, p. 1163.
31. **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>.
32. **Kawata S., Nakashima H.** Tritium content of a DT pellet in inertial confinement fusion. — Laser and Particle Beams, 1992, vol. 10, p. 479.
33. **Eliezer S., Henis Z., Martinez-Val J.M., Vorobeichik I.** Effects of different nuclear reactions on internal tritium breeding in deuterium fusion. — Nuclear Fusion, 2000, vol. 40, p. 195.
34. **Oparin A.M., Anisimov S.I., Meier-ter-Vehn J.** Kinetic simulation of DT compression and burn in ICF targets. — Nuclear Fusion, 1996, vol. 36, p. 443.
35. **Aleksandrova I.V., Koresheva E.R., Osipov I.E., Panina L.V.** Cryotargets for modern ICF experiments. — Laser and Particle Beams, 1996, vol. 6, № 2, p. 539.
36. **Zel'dovich Ya.B.** On the possibility of rarefaction shock waves. — J. Experimental and Theoretical Physics, 1946, vol. 16, p. 363.
37. **Borisov A.I., Borisov A.A., Kutateladze S.S., Nakoriakov V.E.** Evolution of rarefaction waves near thermodynamic critical point. — J. Experimental and Theoretical Physics Letters, 1980, vol. 31, p. 585.
38. **Aleksandrova I.V., Belolipetskiy A.A., Blazevic A. et al.** Cryogenic targets for the LAPLAS experiments: fabrication, manipulation and survival study. Report P034. — In: 30th European Conf. on Laser Interaction with Matter. Darmstadt, Germany, 31 Aug.— 5 Sept., 2008.
39. **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.
40. **National Research Council.** An Assessment of the Prospects for Inertial Fusion Energy. Report, the National Academies Press, Washington D.C., 2013. 229 p.; http://fire.pppl.gov/IFE_NAS_IFE_assessment_2013.pdf.
41. **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.
42. **Koresheva E.R.** High rep-rate production of IFE targets using the FST technologies: progress results and aspects of commercialization. — Ibid.
43. **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 on the XLI International conference on plasma physics and CTF. Zvenigorod, Russia, 10—14 February 2014 (in Russian).

44. **Aleksandrova I.V., Koresheva E.R., Osipov I.E.** Factory conception of cryogenic targets for ITF. Report on the XLII International conference on plasma physics and CTF. Zvenigorod, Russia, 9—13 February 2015 (in Russian).
45. **Nuclear** fusion with inertial confinement. Modern state and prospects for energetics. Coll. of papers edited by B.Yu.Sharkov. — М.: Fizmatlit (PhysMathLit), 2005. 262 p. (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. 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. 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 15 June 2015
Problems of Atomic Science and Technology
Ser. Thermonuclear Fusion, 2015, vol. 38, issue 4, pp. 51—78.