УДК 621.039.(629 + 633) + 621.59

МНОГОУРОВНЕВАЯ СИСТЕМА ЗАЩИТЫ КРИОГЕННОЙ МИШЕНИ ПРИ ЕЁ ДОСТАВКЕ В ФОКУС МОЩНОЙ ЛАЗЕРНОЙ УСТАНОВКИ С ВЫСОКОЙ ЧАСТОТОЙ ПОВТОРЕНИЯ

И.В. Александрова¹, Е.Р. Корешева^{1, 2}, Е.Л. Кошелев¹

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

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

Актуальной проблемой в исследованиях по инерциальному термоядерному синтезу (ИТС) является создание научной, инженерной и технологической базы для решения задачи о сохранении качества топливного слоя в процессе частотной доставки криогенной топливной мишени (КТМ) в фокус мощной лазерной установки или реактора ИТС. В данной статье обсуждается концепция многоуровневой системы защиты КТМ, разработанная в Физическом институте им. П.Н. Лебедева РАН. Концепция включает возможные пути интеграции последних разработок в области формирования устойчивой ультрадисперсной структуры топлива, а также применение внешних способов защиты КТМ, таких как внешние покрытия КТМ (криогенное и/или металлическое), профилирование мишенного гнезда внутри сабота (носителя КТМ), бесконтактная доставка КТМ с помощью гибридного ускорителя, основанного на эффекте квантовой левитации высокотемпературных сверхпроводников в магнитном поле. Результаты, полученные в ходе теоретического и экспериментального моделирования, позволили перейти от стадии концептуализации к стадии технической реализации задачи.

Ключевые слова: инерциальный термоядерный синтез, криогенная топливная мишень, инжекционная доставка, многоуровневая система защиты мишени.

MULTIPLE PROTECTION METHODS FOR CRYOGENIC TARGET DELIVERY TO THE FOCUS OF HIGH REPETITION RATE LASER FACILITIES

I.V. Aleksandrova¹, E.R. Koresheva^{1, 2}, E.L. Koshelev

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

²National Research Nuclear University MEPhI, Moscow, Russia

One of the major challenges of inertial fusion energy (IFE) is the development of scientific, engineering and technological base for cryogenic target survival during its delivery to the laser focus of high repetition rate laser facilities. This report presents a concept of IFE target survival based on multiple target protection methods, which was developed at the P.N. Lebedev Physical Institute of the Russian Academy of Sciences. The concept includes possible ways of integration of our latest developments in the area of fabrication of ultra-fine fuel layers with inherent survival features and application of external protective methods such as cryogenic and/or thin metal overcoats to withstand the thermal chamber environment, profiling of a target nest in the sabot (target carrier), application of a hybrid accelerator for IFE target transport based on quantum levitation of high temperature superconductors in a magnetic field. The results of the experimental and theoretical work allow facilitating the developed technology transfer into engineering applications.

Key words: inertial fusion energy, cryogenic target, injection delivery, multiple target protection methods.

DOI: 10.21517/0202-3822-2018-41-4-73-85

ВВЕДЕНИЕ

Проблема использования криогенных топливных мишеней (КТМ) в экспериментах по инерциальному термоядерному синтезу (ИТС) и, особенно, в будущем реакторе включает в себя не только задачу получения качественного криогенного слоя топлива, но и задачу доставки готовых КТМ в зону лазерного облучения при условии сохранения параметров топливного слоя: температура КТМ в момент облучения лазером должна быть 18,3 К, отклонения от сферичности и концентричности <1%, локальные неоднородности на поверхности топливного слоя <1 мкм [1]. Поскольку криогенный слой является наиболее чувствительным элементом КТМ, то методы формирования слоя с долгоживущими характеристиками качества становятся одним из ключевых моментов в вопросе о производстве криогенного водородного топлива для реактора [1—7].

Одна из важнейших задач при производстве КТМ — это выживаемость криогенных топливных слоёв в процессе доставки КТМ в фокус мощной лазерной установки [3—5]. Процесс доставки включает в себя стадию ускорения КТМ в инжекторе и стадию полёта инжектированной КТМ внутри камеры реактора ИТС. Принципиально не устранимыми источниками механического и теплового разрушения КТМ

на этих стадиях являются перегрузки при ускорении и теплопритоки от излучения стенок камеры и горячего остаточного газа. Это может привести к потере качества слоя, т.е. к появлению разнотолщинности и шероховатости слоя сверх допустимого уровня.

Поиск решения данной проблемы возможен на многоцелевой основе, главные составляющие которой обсуждаются в данной статье.

ФОРМИРОВАНИЕ УЛЬТРАДИСПЕРСНЫХ КРИОГЕННЫХ СЛОЁВ, ОБЛАДАЮЩИХ ДОЛГОЖИВУЩИМИ ХАРАКТЕРИСТИКАМИ КАЧЕСТВА

В настоящее время в исследованиях по ИТС крайне остро стоит проблема получения изотропного криогенного слоя, устойчивого к перегрузкам. Поэтому в программе ИТС проведение широкого спектра исследований в области формирования водородного топлива с заданной структурой слоя, изучение отклика этой структуры на вариацию тепловых, магнитных и механических нагрузок являются важными процессами при выборе реакторных технологий.

Ключевым решением данной проблемы является создание топливного слоя с такой микроструктурой, которая обладает максимально высокой устойчивостью к вариации внешних условий. Значительный прогресс в этом направлении достигнут в области создания технологии, основанной на методе FST (Free-Standing Targets), предложенном и развитом в Физическом институте им. П.Н. Лебедева РАН (ФИАН). Данная задача решалась нами в течение ряда лет, что позволило разработать технологию формирования изотропного криогенного слоя из изотопов водорода, находящегося в ультрадисперсном состоянии [1—11]. Процесс формирования слоя внутри массива движущихся оболочек по методу FST осуществляется при инжекционном транспорте бесподвесных оболочек между основными функциональными элементами системы мишенный контейнер (МК)—транспортный канал формирования (КФ)—тестовая камера (ТК).

Два основных принципа метода FST (рис. 1):

—динамическая симметризация жидкого топлива, т.е. симметризация слоя, обусловленная свободным вращением оболочки при её движении вдоль КФ;

Рис. 1. Формирование криогенного слоя топлива в движущихся оболочках: а — модуль FST-формирования; б — криогенный пьезовибратор (КПВ), расположенный в нижней части криостата; в — спиральные транспортные каналы формирования (1 — одиночная спираль; 2 — двойная спираль); г — криогенный ультрадисперсный слой D_2 -топлива (толщина 41 мкм), полученный в модуле FST-формирования внутри оболочки из полистирола ($\varnothing = 1$ мм)

—охлаждение топлива за счёт контактной теплопроводности между движущейся оболочкой и стенкой КФ. При движении оболочки в результате её контакта с холодной стенкой канала происходит охлаждение топлива и его вымораживание на внутренней поверхности полый сферической оболочки за счёт процесса контактной теплопроводности.

Находящиеся в МК 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 транспортном КФ оболочки движутся в быстрой последовательности, одна за другой, что позволяет реализовать частотную инжекцию готовых КТМ в тестовую камеру.

В настоящее время именно метод FST обеспечивает формирование изотропных слоёв криогенного топлива внутри движущихся сферических оболочек. Это достигается прежде всего за счёт реализации экстремально высоких скоростей охлаждения ($q_{\text{FST}} = 1\text{—}50\text{ K/c}$), что позволяет получить разупорядоченные структуры с большой плотностью дефектов, т.е. изотропную среду, или так называемые ультрадисперсные слои с мелкозернистой или нанокристаллической структурой. Стабилизация полученных структур достигается за счёт введения в состав топлива легирующих добавок.

Изотропные ультрадисперсные слои можно отнести к классу слоёв, обладающих свойством самосохранения, имея в виду их высокую механическую и тепловую устойчивость [3—5]. По существу, речь идёт о получении новых функциональных структур топливного слоя, обладающих долгоживущими характеристиками качества. Последнее имеет первостепенное значение для практической реализации требований по физике сжатия КТМ, а также для сохранения качества топливного слоя при доставке готовых КТМ в камеру реактора ИТС [6, 7].

Дальнейшее развитие этого направления связано с использованием криогенного пьезовибратора (КПВ) (см. рис. 1, б) [8, 9]. Эксперименты показали, что наличие внешних периодических воздействий на жидкую фазу вещества в процессе его кристаллизации позволяет регулировать дисперсность получаемой твёрдой фазы и повысить устойчивость слоя, а значит сделать технологию FST более надёжной и дешёвой. Такие воздействия (например, вибрации) приводят к тому, что, начиная с некоторого момента времени, определяемого амплитудой и частотой воздействия, рост зародышей кристаллической фазы прекращается. Дальнейшая их эволюция происходит двумя путями: либо часть зародышей полностью растворяется, либо выжившие зародыши попадают в режим динамического равновесия, при котором их размеры осциллируют около постоянного значения, а их концентрация во времени уже не меняется.

В наших экспериментах КПВ размещался внутри оптической ТК, расположенной в нижней части криостата (см. рис. 1, б). Внутри КПВ устанавливалась пластина из пьезокристалла (ПК) с закреплёнными концами. Движение КТМ относительно поверхности ПК осуществляется за счёт обратного пьезоэлектрического эффекта при подаче на ПК напряжения заданной амплитуды и частоты. При этом частота вибраций приобретала наибольшую амплитуду, когда частота изменений электрического напряжения совпадала с частотой собственных колебаний ПК. В зависимости от выбора частоты вибраций возможна генерация различных мод движения КТМ: вращение (мода *B*) и отражение от поверхности кристалла (мода *O*), а также смешанная мода (мода *C*) [9].

Формирование твёрдого слоя из дейтерия (D_2) внутри полимерных оболочек с помощью КПВ показано на рис. 2. Охлаждение оболочки ниже температуры тройной точки $T_{\text{тр}} = 18,7\text{ K}$ для D_2 осуществлялось только

Рис. 2. Формирование твёрдого D_2 -слоя внутри полимерных оболочек с помощью КПВ (оболочки $\varnothing \sim 1,35\text{ мм}$, давление заполнения 350 атм. при 300 K): *a* — исходное состояние перед началом охлаждения при $T_0 = 20\text{ K}$; *б* — охлаждение неподвижной оболочки, вибраций нет (конечная температура $T_{\text{к}} = 13\text{ K}$); *в* — охлаждение, слабые вибрации, $\nu = 2,25\text{—}3,5\text{ кГц}$ ($T_{\text{к}} = 13\text{ K}$); *г* — охлаждение, сильные вибрации, $\nu = 3,75\text{ кГц}$ ($T_{\text{к}} = 5,8\text{ K}$)

через пятно контакта (в камере вакуум), при этом скорость охлаждения $q = 0,1$ К/с на порядок меньше, чем нижний предел q_{FST} , что является перспективным при создании технологий формирования слоя в реакторных КТМ. Начальное состояние топлива внутри оболочки «жидкость + пар» (см. рис. 2, а). Экспериментально показано, что величина относительной амплитуды $A = H/2R$ (H — высота максимального подъёма; R — внешний радиус оболочки) может меняться в широких пределах в зависимости от частоты управляющего импульса: от полутора до десяти диаметров внешней оболочки КТМ [8, 11]. Хорошо видно, что при различных условиях формирования структуры получаемого твёрдого слоя D_2 различаются:

- отсутствие вибраций ($v = 0$): образуется крупнозернистый кристаллический слой (см. рис. 2, б);
- слабые вибрации ($A = H/R < 4$): характерная кристаллическая структура начинает как бы «расплываться» за счёт появления более высокодисперсных кластеров (см. рис. 2, в);
- сильные вибрации ($A = H/R \sim 10$): формируется твёрдая дисперсная фаза дейтерия, которая достаточно равномерно покрывает внутреннюю поверхность оболочки (см. рис. 2, г).

Это позволяет осуществить модернизацию классического модуля FST-формирования (см. рис. 1, а), основным элементом которого является охлаждаемый транспортный КФ в виде простой или двойной спирали (см. рис. 1, в), по которому движутся оболочки с топливом. Вибрации с частотой 3,5—10 кГц, способствующие структурированию топлива, будут возбуждаться в верхней части транспортного КФ, который в процессе вымораживания топлива будет служить своеобразным волноводом для передачи возмущения на поверхность движущейся КТМ. Такие условия способствуют формированию криогенного слоя в виде ультрадисперсной структуры (см. рис. 1, г), что обеспечивает сохранение качества слоя при ускорении, инжекции и транспорте КТМ в камеру реактора ИТС [8, 9].

ВНЕШНИЕ ЗАЩИТНЫЕ ФАКТОРЫ КТМ-КАПСУЛЫ

Другой подход к решению проблемы сохранения параметров топливного слоя основан на применении специальных защитных средств для КТМ-капсулы как целого. Мы имеем в виду дополнительные способы защиты, когда КТМ готова, т.е. топливный слой требуемого качества уже сформирован. Рассмотрим ряд методов, разработанных в ФИАН для реализации поставленной задачи.

Защитная крышка (ЗК). Отметим, что в случае, когда дизайн реакторной камеры включает остаточный газ, инжектированная КТМ подвергается не только тепловому излучению стенок камеры, но и конвективному нагреву со стороны горячего газа. В этих условиях проблема выживания инжектированной КТМ становится ещё более сложной. В ряде работ предложено использовать металлические плоские экраны [12] или цилиндрические [13], летящие в камере перед КТМ. Специалистами ФИАН предложен другой подход [14, 15] — использовать ЗК из отверждённых газов, которая инжектируется в камеру реактора вместе с КТМ и летит перед ней (рис. 3, а), защищая её от воздействия лобового ветра из горячих остаточных газов. В процессе движения по камере ЗК постепенно испаряется и к моменту прихода КТМ в зону облучения она полностью исчезает. Как показали расчёты [14], применение ЗК позволяет снизить тепловой поток на КТМ от остаточного газа в 4—5 раз. Устройство частотной сборки «Сабот + КТМ + ЗК» (рис. 3, б) было разработано и предложено в работе [14].

Рис. 3. ЗК из отверждённых газов: а — инжекция КТМ вместе с ЗК в камеру реактора; б — схема устройства для частотной сборки ансамблей «Сабот + КТМ + ЗК»; 1 — модуль FST-формирования КТМ; 2 — накопитель с массивом готовых КТМ; 3 — шифер для гравитационной подачи КТМ в сборочный барабан; 4 — сборочный барабан; 5 — магазин саботов; 6 — экструдер для производства ЗК из твёрдого дейтерия; 7 — соленоид для подачи ансамблей «Сабот + КТМ + ЗК» на стартовую позицию в инжектор

Внешний защитный слой из металла. Общепринято, что тонкие металлические слои, напылённые на внешнюю поверхность КТМ, могут служить хорошей защитой топливного слоя от разрушения тепловым излучением стенок камеры реактора. Однако наличие металлического слоя может существенно повлиять на процесс заполнения КТМ топливным газом. Поэтому в работах ФИАН [15, 16] разработана технология напыления на поверхность КТМ-капсулы палладия, платины или их сплавов (рис. 4). Слой палладия не только может защитить инжектированную КТМ от излучения стенок камеры, но и ускорить процесс диффузионного заполнения КТМ топливным газом, что было продемонстрировано в экспериментах ФИАН [16]. Это связано с тем, что палладий служит катализатором диссоциации молекулярной фазы водорода в атомарную, что ускоряет диффузию топлива сквозь полимерную оболочку КТМ. Кроме того, как показали наши расчёты, такой металлический слой также позволяет ускорить процесс формирования внутри КТМ топливного слоя по методу FST [17].

Отметим, что наши разработки по заполнению оболочек, покрытых палладием, были приняты к использованию в Калифорнийском университете г. Сан-Диего, США [18].

Внешний защитный слой из отверждённых газов. Наши исследования показали [6, 14, 19—21], что перспективным элементом защиты КТМ является криогенный слой из твёрдого D_2 или ксенона, нанесённый на внешнюю поверхность КТМ. Этот криогенный слой защищает КТМ от перегрева излучением горячих стенок камеры реактора. Под воздействием излучения стенок внешний слой постепенно испаряется, охлаждая КТМ и защищая от перегрева топливный слой, расположенный внутри капсулы.

Технология создания внешнего защитного криогенного слоя была разработана в ФИАН и продемонстрирована с использованием твёрдого кислорода. Для создания внешнего криогенного слоя использовался КПВ [9]. В качестве исследуемого изотопа был выбран водород по следующим причинам. Тройная точка для кислорода равна $T_{тр} = 54,3$ К, для водорода $T_{тр} = 13,96$ К, для дейтерия $T_{тр} = 18,73$ К. Поскольку наносился внешний твёрдый криогенный слой, т.е. отсутствует какой-либо контакт с исследуемым изотопом, то важно, чтобы температура оболочки была ниже тройной точки для кислорода $T < 54,3$ К. Водород здесь использовался как более дешёвый изотоп по сравнению с дейтерием, а также потому, что условия формирования твёрдого слоя будут тем более сложными, чем ниже температура оболочки. Поэтому если для водорода эксперименты будут успешными, то ожидаемый результат может быть достигнут как для дейтерия, так и для D—T-смеси ($T_{тр} = 19,7$ К).

Эксперименты были выполнены следующим образом (рис. 5):

— в каждой оболочке содержится жидкий водород при температуре $T = 14,6$ К (тройная точка для водорода 13,96 К). Снаружи в верхней части оболочек расположен кислородный снег (тройная точка для кислорода 54,3 К);

— после работы КПВ твёрдый кислород равномерно распределяется по внешней поверхности оболочек в виде защитного криогенного слоя.

Отметим, что оболочка № 1 на рис. 5, а имеет внешний слой палладия (толщина 150 Å), что крайне важно для формирования двойного защитного покрытия, а именно «металлический слой + внешний криогенный слой».

Система бесконтактной доставки КТМ на основе магнитной левитации (Маглев) высокотемпературных сверхпроводников (ВТСП). В процессе доставки КТМ размещается в специальном носи-

Рис. 4. КТМ с внешним металлическим покрытием (производство ФИАН): а — внешнее покрытие 150 Å из Pd, криогенный слой $H_2+5\%HD$ толщиной 44 мкм, сформированный на внутренней поверхности полимерной оболочки диаметром 1,4 мм; б — внешнее покрытие 200 Å из сплава Pt/Pd, криогенный слой $D_2 + 3\%Ne$ толщиной 50 мкм, сформированный на внутренней поверхности полимерной оболочки диаметром 1,5 мм

Рис. 5. Создание внешнего криогенного защитного слоя из кислородного O_2 -снега: а — две полимерные оболочки внутри КПВ до эксперимента (№ 1 $\varnothing = 1,2$ мм, № 2 $\varnothing = 1,4$ мм), причём оболочка № 1 имеет покрытие из палладия (150 Å); б — после работы КПВ непрозрачный защитный криогенный слой равномерно покрывает каждую КТМ

теле (так называемый сабот). При ускорении ансамбля «Сабот + КТМ» существует угроза разрушения топливного слоя — это выделение тепла за счёт трения поверхности сабота о стенки направляющей трубки инжектора. Создание системы бесконтактного позиционирования и транспорта КТМ представляет собой одну из важнейших задач в общей программе ИТС. Цель разработок — обеспечить сохранение качества топливного слоя при ускорении и инжекции КТМ в фокус мощной лазерной установки или реактора ИТС.

Чтобы исключить указанный источник теплового разрушения топливного слоя и снизить риски при работе инжектора, в ФИАН было предложено использовать в качестве носителя КТМ сабот из сверхпроводящего материала [10, 11]. В этом направлении интенсивно проводятся исследования по созданию системы бесконтактной доставки КТМ, основанной на эффекте квантовой левитации ВТСП в направляющей системе PMG (permanent magnet guideway). Магнитные системы PMG конструируются на основе постоянных неодимовых магнитов (NdFeB) без покрытия с аксиальным намагничиванием. Измерения вертикальной составляющей магнитного поля PMG-систем проводились с помощью магнитометра, изготовленного на основе датчика Холла типа ДХК-0.5А чувствительностью 280 мВ/Тл. Диапазон измеряемого поля ± 1 Тл, погрешность измерений $\pm 0,005$ Тл, точность положения чувствительного элемента 0,1 мм. При этом в экспериментах исследовались магнитные поля различной конфигурации — круговые и линейные (рис. 6) с применением макетов саботов, изготовленных из различных ВТСП-материалов, в том числе это сверхпроводящая керамика на основе $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$ (аббревиатура Y123) и ленточные ВТСП типа СуперОкс J-Pi-12-20Ag-20Cu (аббревиатура Gd123).

Рис. 6. Левитация ВТСП-сабота в магнитных полях различной конфигурации: а — круговая PMG-система (цилиндрические суррогатные мишени с общим весом 3,3 г: 1 — $T = 300$ К; 2, 3, 4 — последовательные стоп-кадры ускорения при $T = 80$ К); б — линейная PMG-система (сферические суррогатные мишени диаметром 2 мм с общим весом 3,3 г: 5 — $T = 300$ К; 6, 7, 8 — последовательные стоп-кадры ускорения при $T = 80$ К)

Сделаем необходимое замечание относительно температуры проведения экспериментов. Ранее авторами были проведены исследования в широком диапазоне температуры $\Delta T = 5\text{—}80$ К [10, 11]. Эксперименты продемонстрировали эффективность взаимодействия пары «ВТСП—PMG» во всём диапазоне ΔT , что даёт возможность проведения исследований по движению ВТСП-объектов вблизи 80 К, т.е. в условиях азотной криогеники (температура кипения жидкого азота $T_{\text{Ne}} = 77$ К), а не гелиевой ($T_{\text{He}} = 4,2$ К), что значительно дешевле. Поэтому в дальнейшем мы продолжили исследования именно при азотных температурах, но не только с целью удешевления стоимости экспериментов, а имея в виду малые размеры тестовой камеры криостата (см. рис. 1), с целью обеспечения требуемых пространственных масштабов для демонстрации движения ВТСП-сабота.

В настоящее время в ФИАН завершено создание концепции и проведены контрольные эксперименты по разработке инжектора с электромагнитным запускающим импульсом и системой коррекции траектории носителя КТМ в виде ансамбля «ВТСП-сабот + КТМ». Концепция отличается от известных систем ускорения применением следующих элементов [10, 11]:

— сверхпроводящий сабот, который содержит в себе не только ускоряемый ВТСП-виток с током (были исследованы кабели на основе сверхпроводящего MgB_2), но и ВТСП-пластины/ленты, обеспечивающие стабильную левитацию ВТСП-сабота;

— левитационная система ускорения, которая содержит в себе не только ускоряющую систему коротких соленоидов для генерации бегущей магнитной волны, но и магнитный рельс (как составная часть PMG) для обеспечения как левитации, так и стабилизации траектории ВТСП-сабота за счёт пиннинг-эффекта.

Основные выводы, которые можно сделать в настоящее время, заключаются в следующем:

— теоретически и экспериментально показано [10, 11], что исследованные материалы могут успешно применяться при разработке и конструировании электромагнитного (ЭМ) инжектора КТМ с системой коррекции траектории ВТСП-сабота с целью минимизировать риск разрушения топливного слоя в КТМ на этапе её ускорения. Принцип работы электромагнитного ускорителя с ВТСП-саботом запатентован в 2017 г. [22]. В настоящее время ВТСП-материалы в виде композитных лент на основе купратов становятся доступными для промышленного применения. Эти материалы, имеющие рекордные характеристики по критическим параметрам, являются перспективными кандидатами при создании гибридных систем бесконтактной доставки КТМ;

— теоретически и экспериментально показано [10, 11], что возможно реализовать одновременное ускорение и левитацию ВТСП-сабота в поле короткого соленоида и линейной PMG-системы (рис. 7, а).

В серии экспериментов был испытан способ электромагнитного ускорения ВТСП-сабота. Вследствие эффекта Мейснера на сверхпроводник в магнитном поле действуют силы, выталкивающие его из области большего поля, что может быть использовано для ускорения сверхпроводящего образца. В экспериментах использовались магнитная PMG-система (рис. 7, б) и одна катушка, укрепленная над магнитным рельсом таким образом, чтобы горизонтальные оси катушки и сабота (рис. 7, в), левитирующего над PMG, совпадали (рис. 7, г). Когда через катушку подаётся короткий импульс тока, ВТСП-сабот приходит в движение вдоль горизонтальной оси магнитной системы. Стоп-кадры видеозаписи ускорения ВТСП-сабота (выполнен из Gd123) над PMG-системой представлены на рис. 7, а. Параметры эксперимента следующие: длительность импульса тока 1 мс, амплитуда тока 200 А (создаётся при разряде конденсатора ёмкостью 1600 мкФ), зарядка конденсатора 300 В, температура проведения эксперимента $T = 80$ К.

Следует сделать несколько замечаний относительно стабильности траектории движения ВТСП-сабота. Главная идея состоит в том, что устройство PMG-системы должно быть таково, чтобы ВТСП-сабот мог свободно двигаться только в одном направлении. Цель — избежать любого контакта с более сильным магнитным полем, которое выталкивает сверхпроводник и возвращает его на исходную траекторию. В нашем случае вдоль PMG-системы (магнитный трек из постоянных магнитов, см. рис. 6, 7) нет никаких изменений магнитного поля, что позволяет ВТСП-саботу двигаться вдоль траектории ускорения без потери энергии. В поперечном же направлении, напротив, задача заключается именно в создании неоднородного магнитного поля. Это достигается за счёт того, что полюса магнитов выстроены антипараллельно друг другу (N—S—N), что позволяет реализовать значительный градиент магнитного поля вдоль ширины магнитного трека. Этот градиент предотвращает смещение ВТСП-сабота, и он оста-

Рис. 7. Ускорение левитирующего ВТСП-сабота при $T = 80$ К в поле короткого соленоида и линейной PMG-системы: а — последовательные стоп-кадры ускорения (средняя скорость ВТСП-сабота 21,6 см/с); б — PMG-система на основе постоянных неодимовых магнитов (поле в плоскости расположения магнитов вдоль линии ускорения постоянно и равно $B = 0,33$ Тл); в — короткий соленоид; г — ВТСП-сабот в форме параллелепипеда на основе Gd123; д — ВТСП-сабот в состоянии левитации до подачи ускоряющего импульса движения

ётся как бы «пойманным в ловушку» в поперечном направлении. Результаты соответствующей серии экспериментов детально описаны в работах [10, 11].

Таким образом, бесконтактное ускорение КТМ можно осуществить за счёт инновационной схемы построения ЭМ-ускорителя с использованием систем ВТСП—Маглев различного типа.

Оптимизация формы мишенного гнезда при ускорении КТМ в ЭМ-ускорителе. Отметим, что при ускорении системы «Сабот + КТМ» существует и другая, кроме тепловой, угроза разрушения топливного слоя. Рассмотрим этот вопрос более подробно.

Необходимым узлом непрерывной доставки КТМ в зону горения реактора ИТС является инжектор. На первом этапе доставки КТМ помещается в гнездо специального носителя — сабота. В инжекторе система «Сабот + КТМ» ускоряется до необходимой скорости (200—400 м/с), после чего КТМ отделяется от сабота, инжектируется внутрь камеры реактора и летит по направлению к её центру. При ускорении сабота до необходимых скоростей вместе с лежащей в нём КТМ возникают механические перегрузки, воздействующие на КТМ со стороны опоры мишенного гнезда. КТМ подвергается осевым нагрузкам, в результате чего может произойти механическое разрушение составляющих её элементов. Проведённый анализ показал, что форма мишенного гнезда — опора КТМ, расположенная внутри сабота, существенно определяет возможность ускорения КТМ без механического разрушения.

Для определения разрушающего значения перегрузки КТМ в процессе её ускорения были проведены численные расчёты возникающих в КТМ напряжений и деформаций. В расчётах учитывалась температурная зависимость механических свойств полистирола. В частности, проведённые авторами ранее измерения показали, что предел прочности на разрыв стенки полистирольной микросферы увеличивается в среднем в 4,5 раза при охлаждении от 300 до 40 К [21]. Расчёты проводились в условиях ускорения КТМ при $T = 4,2$ К, поскольку в этой области температуры прочность твёрдых водородов в 2—3 раза выше, чем при $T = 17$ —18 К [23]. Этот подход существенно снижает риски разрушения КТМ вследствие перегрузок, возникающих в процессе ускорения.

КТМ рассматривалась как тонкостенная сфера, состоящая из двух слоёв: полистирола и твёрдого дейтерия. Рассмотрим классическую реакторную КТМ (рис. 8, з) [24]: диаметр оболочки 4 мм, толщина стенки $\Delta R = 45$ мкм, сферический слой твёрдого дейтерия (или D—T-смеси: 50% молекул DT, 25% дейтерия и 25% трития, $T_{\text{тр}} = 19,7$ К) расположен на внутренней поверхности оболочки, толщина слоя 200 мкм. Запас прочности принимался равным 1,3. Механические характеристики материалов даны в табл. 1.

Т а б л и ц а 1. Механические свойства материалов, из которых состоит КТМ

Материал	E , МПа	ν	σ , МПа
Полистирол	2000	0,25	14,9
Твёрдый D ₂	473	0,30	0,54

Примечание: E — модуль Юнга; ν — коэффициент Пуассона; σ — прочность на сжатие.

Рис. 8. КТМ, расположенная в мишенном гнезде сабота: а — плоская опора; б — полусферическая опора; в — коническая опора; г — реакторная КТМ высокого выхода [22]; 1 — полистирольная оболочка диаметром 4 мм и толщиной стенки 45 мкм; 2 — сферический слой твёрдого D₂- или D—T-топлива толщиной 200 мкм; 3 — топливный пар

Рассматриваемая сферическая КТМ относится к классу тонкостенных осесимметричных оболочечных конструкций, для которых в настоящее время разработаны эффективные методы и алгоритмы решения краевых задач теории тонкостенных оболочек [25]. В монографии [25] рассмотрен также пакет прикладных программ, адаптированный к реализации вычислений на персональных компьютерах в виде интегрированной системы автоматизации конструирования и прочностных расчётов изделий машиностроения КИПР_РС/АТ2 [26]. Матрицы жёсткости конечных элементов вычисляются методом ортогональной прогонки [27].

При расчётах были рассмотрены следующие формы опоры КТМ (рис. 8, а, б, в): плоская, полусферическая, одинакового радиуса с КТМ

($\Delta = 0$), полусферическая с радиусом больше, чем у КТМ ($\Delta \neq 0$). Здесь параметр Δ представляет собой величину диаметрального зазора между КТМ и полусферической опорой. Отметим важность данного параметра, так как на практике достаточно трудно изготовить массив КТМ абсолютно одинакового размера, чтобы диаметры полусферической опоры и оболочки КТМ не отличались.

Наши исследования показали, что наибольшие напряжения в случаях плоской и полусферической опоры с зазором ($\Delta > 0$) возникают по периметру пятна контакта. Для полусферической опоры без зазора ($\Delta = 0$) деформация возникает вне области контакта.

Кроме того, расчёты показали, что в случае плоской опоры разрушающее значение перегрузки на КТМ в ~60 раз меньше, чем в случае полусферической опоры без зазора (табл. 2). При зазоре 10 мкм допустимые перегрузки снижаются в 25 раз по сравнению с идеальным случаем полусферической опоры $\Delta = 0$ (см. табл. 2). При $\Delta \geq 26$ мкм разрушение возникает при тех же перегрузках, что и при использовании плоской опоры. Таким образом, применение полусферической опоры оправдано только при реализации малых зазоров Δ .

Т а б л и ц а 2. Допустимые перегрузки на КТМ при различных формах мишенного гнезда в саботе ($T = 4,2\text{—}17\text{ K}$)

Форма гнезда	Δ/α	a/g
Плоскость (рис. 8, а)	—	310
Полусфера (рис. 8, б)	$\Delta = 0$ мкм	19 136
	$\Delta = 10$ мкм	835
	$\Delta = 20$ мкм	382
	$2\alpha = 149^\circ$	2744
Конус (рис. 8, в)	$2\alpha = 118^\circ$	5400
	$2\alpha = 87^\circ$	6340

Примечание: a — ускорение сабота с КТМ, g — ускорение свободного падения.

С этой точки зрения идея применения мембранной подложки, предложенная в США и продемонстрированная в опытах по ускорению мишеней при 300 К [28], кажется перспективным подходом, позволяющим достичь условия $\Delta \sim 0$ для полусферического гнезда и, таким образом, существенно снизить вероятность разрушения КТМ вследствие перегрузок. Следует, однако, иметь в виду, что материал мембраны теряет свою эластичность при криогенных температурах (4,2—17 К), что может служить препятствием к практическому воплощению данного подхода.

В связи с этим мы провели дальнейшую компьютерную оптимизацию геометрии мишенного гнезда, которая показала, что коническая форма опоры (см. рис. 8, в) позволяет существенно повысить уровень допустимых перегрузок по сравнению с плоской опорой (см. табл. 2). В частности, применение конической опоры с углом в основании конуса, равным 87° , позволяет повысить допустимые перегрузки на КТМ более чем в 20 раз (расчёт проведён для КТМ, показанной на рис. 8 з). Хотя выигрыш в перегрузках здесь меньше, чем в идеальном случае (полусферическая опора при $\Delta = 0$), однако применимость для КТМ различного диаметра делает коническую форму мишенного гнезда наиболее практически приемлемой.

Таким образом, использование сабота со специально профилированной опорой для КТМ является эффективным средством её защиты от механического разрушения на этапе ускорения. Поэтому приоритетным направлением при создании системы бесконтактной доставки типа «ЭМ-инжектор + ВТСП-Маглев» является разработка специального дизайна для ансамбля «ВТСП-сабот + КТМ» (рис. 9) с учётом найденных закономерностей в профилировании формы мишенного гнезда.

Рис. 9. Использование ВТСП-сабота со специально профилированным мишенным гнездом в системе ускорения и инъекции КТМ

КОНЦЕПЦИЯ МНОГОУРОВНЕВОЙ СИСТЕМЫ ЗАЩИТЫ ТОПЛИВНОГО СЛОЯ

Необходимым элементом современных исследований в области ИТС является производство КТМ для установок мегаджоульного класса. Топливный слой в КТМ должен находиться в ультрадисперсном состоянии, чтобы минимизировать риск её разрушения под действием внешних тепловых и механических перегрузок, возникающих при доставке КТМ в лазерный фокус установки ИТС. Это обусловлено тем, что твёрдые изотопы водорода состоят из анизотропных молекулярных кристаллов. Такая структура топлива может привести к потере качества слоя как в процессе ускорения КТМ, так и на этапе её сжатия при прохождении по слою сферической ударной волны.

В последнее время в ФИАН интенсивно развиваются структурно-чувствительные методы, позволяющие формировать требуемую микроструктуру топлива применительно к задачам ИТС. Кроме того, особо подчёркнём, что процесс формирования и доставки КТМ с необходимостью включает в себя систему многоуровневой защиты топливного слоя, функционирование которой основано на следующих принципах [29].

1. Применение топливного слоя с изотропной высокодисперсной микроструктурой для снижения его чувствительности к воздействию внешних тепловых и механических нагрузок [3—5].

2. Применение способа бесконтактной доставки ансамбля «ВТСП-сабот + КТМ» с целью исключить тепловой поток на КТМ, возникающий за счёт трения между стенками сабота и направляющей трубкой инжектора:

— показано [11], что при использовании сверхпроводящего кабеля на основе MgB_2 в качестве ускоряющего элемента (критический ток 5000 А, магнитная индукция 0,25 Тл) можно не только ускорить реакторную КТМ до требуемых скоростей, но и обеспечить выполнение условия по снижению перегрузок в процессе ускорения ($a < 500g$);

— показано [11], что при использовании ускорителя «ЭМ-инжектор + PMG» реализуются следующие параметры: на длине ускорения $L_a = 5$ м реакторная КТМ достигает скорости 200 м/с при ускорении $a = 400g$. При этом высота левитации сабота типа СуперОкс (Gd123) составила ~3 мм, а Сабота из сверхпроводящей керамики (Y123) ~5 мм.

3. Применение конической опоры мишенного гнезда в саботе для снижения механических нагрузок, возникающих в процессе ускорения ансамбля «ВТСП-сабот + КТМ».

4. Применение внешних покрытий КТМ для снижения риска разрушения топливного слоя под действием излучения горячих стенок камеры реактора ИТС:

- внешние защитные криогенные слои (из отверждённого дейтерия, водорода или ксенона);
- внешние защитные металлические слои на основе золота, палладия и его сплавов;
- применение двойного защитного покрытия «металлический слой + криогенный слой».

Напомним, что сферическая КТМ должна иметь в момент облучения лазером температуру не выше 18,3 К. При этом температура стенки самой реакторной камеры может достигать значительных величин (для реактора SOMBRERO указанная величина составляет 1758 К [28]).

5. Инжекция КТМ с ЗК из отверждённого газа [14] для снижения риска разрушения топливного слоя под действием излучения горячих стенок камеры реактора ИТС.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результатом многолетней работы авторов явилось создание в Физическом институте им. П.Н. Лебедева РАН уникальной технологии быстрого FST-формирования КТМ для высокочастотной подачи топлива в зону термоядерного горения в установках ИТС. Фундаментальное отличие метода FST от традиционного подхода — это положенный в его основу принцип работы с движущимися бесподвесными КТМ, что позволяет осуществлять формирование и инжекцию в лазерный фокус дешёвых КТМ в непрерывном режиме или с необходимой частотой. Именно поэтому метод FST является перспективным путём решения проблемы поточного производства и инжекционного транспорта КТМ, а также организации производственного процесса на будущих реакторах. На рис. 10 представлен один из вариантов практической реализации предложенного подхода, включающий также и многоуровневую систему защиты КТМ.

Рис. 10. Концепция поточного производства и частотной доставки бесподвесных КТМ, включающая многоуровневую систему защиты криогенного топливного слоя при доставке КТМ с высокой частотой повторения в фокус мощной лазерной установки: КТМ — криогенная топливная мишень; ЗК — защитная крышка; ВТСП-сабот — носитель КТМ; ЭМ — электромагнитный инжектор

Работа выполнена в рамках проектов РФФИ №15-02-02497, МАГАТЭ № 20344, а также в рамках ГЗ ФИАН по теме № 4 «Физика конденсированного состояния: новых материалов, молекулярных и твердотельных структур нанофотоники, наноэлектроники и спинтроники».

REFERENCES

1. **Aleksandrova I.V., Koresheva E.R., Krokhn 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.** Review on high repetition rate and mass production of the cryogenic targets for laser IFE. — High Power Laser Science and Engineering, 2017, vol. 5, pp.1—24.
3. **Aleksandrova I.V., Belolipetskiy A.A., Koresheva E.R., Tolokonnikov S.M.** Survivability of fuel layers with a different structure under conditions of the environmental effects: Physical concept and modeling results. — Laser and Particle Beams, 2008, vol. 26, № 4, p. 643.
4. **Aleksandrova I.V., Belolipetskiy A.A., Koresheva E.R. et al.** Thermal and mechanical responses of cryogenic targets with a different fuel layer anisotropy during delivery process. — J. Russian Laser Research, 2008, vol. 29, № 5, p. 419.
5. **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.
6. **Aleksandrova I.V., Koresheva E.R., Koshelev E.L. and 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.
7. **Aleksandrova I.V., Koresheva E.R., Koshelev E.L. et al.** Cryogenic hydrogen fuel for controlled inertial confinement fusion (concept of cryogenic target factory based on FST-layering method). — VANT. Ser. Termoyadernyi sintez (Problems of Atomic Science and Technology. Ser. Thermonuclear Fusion), 2016, vol. 39, № 1, p. 30 (in Russian).
8. **Aleksandrova I.V., Akunets A.A., Koresheva E.R. et al.** Cryogenic layer fabrication in the conditions of high-frequency mechanical influence. — In: 34th European Conf. on Laser Interaction with Matter. Moscow, Russia, September 18—23, 2016.
9. **Aleksandrova I.V., Akunets A.A., Koresheva E.R. et al.** Ultra-fine hydrogen layer fabrication in the conditions of out-vibrating influence on a cryogenic target. — VANT. Ser. Termoyadernyi sintez (Problems of Atomic Science and Technology. Ser. Thermonuclear Fusion), 2017, vol. 40, issue 3, p. 49 (in Russian).
10. **Aleksandrova I.V., Akunets A.A., Koresheva E.R. et al.** Development of hybrid transport systems for delivering cryogenic fusion targets into focus of high-power laser system or ICF reactor. — J. Russian Laser Research, 2017, vol. 38, № 3, p. 249.
11. **Aleksandrova I.V., Koshelev E.L., Nikitenko A.I. et al.** Magnetic acceleration of the levitating sabot made from type-II superconductors. — J. Russian Laser Research, 2018, vol. 39, № 2, p. 140.
12. **Valmianski E.I., Petzoldt R.W., Alexander N.B.** Wake shield target protection. — Fusion Sci. Technol., 2003, vol. 43 (3), pp. 346—352.
13. **Tsuji R.** Flying metal pipe for target transport in inertial fusion energy reactor. — Ibid., pp. 327—333.
14. **Osipov I.E., Koresheva E.R., Baranov G.D. et al.** A Device for cryotarget rep-rate delivery in IFE target chamber. — In: Inertial Fusion Science and Application, State of the art 2001 (ELSEVIER), p. 810.
15. **Koresheva E.R., Aleksandrova I.V., Osipov I.E. et al.** Progress in the extension of free-standing target technologies on IFE requirements. — Fusion Sci. Technol., 2003, vol. 43, № 3, p. 290.
16. **Koresheva E.R.** Progress in the Extension of free-standing target technologies on IFE requirements. — In: 2nd IAEA TM on Physics and Technology of Inertial Fusion Energy Targets and Chambers. San-Diego, USA, June 17—19, 2002; http://aries.ucsd.edu/LIB/MEETINGS_
17. **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.
18. **Stefens E.H., Nikroo A., Goodin D.T., Petzoldt R.W.** Optimizing high-Z coatings for inertial fusion energy shells. — Fusion Sci. Technol., 2003, vol. 43(3), pp. 346—352.
19. **Koresheva E.R., Osipov I.E., Aleksandrova I.V.** Free-standing target technologies for inertial confinement fusion: fabrication, characterization, delivery. — Laser and Particle Beams, 2005, vol. 23, p. 563.
20. **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 XLI International conference on plasma physics and CTF, Zvenigorod, Russia, 10—14 February 2014 (in Russian).

21. **Aleksandrova I.V., Koresheva E.R., Osipov I.E.** Factory conception of cryogenic targets for ITF. — In the same place, Zvenigorod, Russia, 9—13 February 2015 (in Russian).
22. **Nakai S., Miley J.** Physics of High Power Laser and Matter Interactions. — Singapore: Word Scientific Publishing, 1992.
23. **Myachenkov V.I., Mal'tsev V.P.** Methods and algorithms for calculation of spatial structures on Electronic Computers of Unified System. — M.: Mashinostroenie (Machine-building), 1984. 280 p. (in Russian).
24. **Myachenkov V.I., Chekanin A.V., Ol'shanskaya G.N.** Automation of design and strength calculations of thin-walled axisymmetric structures (CYPRUS-IBM 3.0). — M.: MSTU «STANKIN», 2001, 88 p. (in Russian).
25. **Godunov S.K.** On the numerical solution of boundary-value problems for systems of ordinary differential equations. — Uspekhi matematicheskikh nauk (Advances in mathematical sciences), 1961, vol. XVI, issue 3(99), p. 171 (in Russian).
26. **Goodin D.T., Alexander N.B., Brown L.C. et al.** Demonstrating a target supply for inertial fusion energy. IAEA-TECDOC-1466, — Vienna: International Atomic Energy Agency, September 2005.
27. **Aleksandrova I.V., Koresheva E.R., Koshelev E.L. et al.** Conception of the cryogenic target factory for mass manufacturing and high-rep-rate delivery of IFE targets. — In: the 34th European Conf. on Laser Interaction with Matter. Moscow, Russia, September 18—23, 2016.
28. **Aleksandrova I.V., Akunets A.A., Koresheva E.R. et al.** Mechanical mockup of IFE reactor intended for the development of cryogenic targets mass production and rep-rate delivery into the burn area.— In: the IAEA 8th Technical Meeting on Physics and Technology of Inertial Fusion Energy Chambers and Targets. Tashkent, Uzbekistan, March 8—9, 2018.
29. **Aleksandrova I.V., Koresheva E.R., Koshelev E.L. et al.** System concept of fuel layer multi-level protection for the cryogenic targets delivery to the focus of a powerful laser facility or ITF reactor. — Report on XLV International conference on plasma physics and CTF. Zvenigorod, Russia, 2—6 April, 2018 (in Russian).

AUTHORS

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

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

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

Received 27 July 2018

Revised 27 July 2018

Accepted 27 September 2018

Problems of Atomic Science and Technology

Ser. Thermonuclear Fusion, 2018, vol. 41, issue 4, pp. 73—85