УДК 621.039.633

КРИОГЕННОЕ ВОДОРОДНОЕ ТОПЛИВО ДЛЯ УПРАВЛЯЕМОГО ИНЕРЦИАЛЬНОГО ТЕРМОЯДЕРНОГО СИНТЕЗА (ОБЗОР МИРОВЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ)

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

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

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

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

Характерная особенность текущего этапа в развитии управляемого инерциального термоядерного синтеза (ИТС) — создание научной и технологической базы для высокочастотной подачи криогенного водородного топлива в фокус мощной лазерной установки или реактора ИТС. Основные проблемы здесь связаны с разработкой технологии массового производства топливных мишеней и необходимостью их инжекции в камеру реактора с частотой 1—10 Гц. В обзоре дан сравнительный анализ современного состояния работ в мире в этой области. Представлены результаты большого цикла экспериментальных и теоретических исследований, продемонстрировавших, что в России создан опережающий научно-технологический задел для построения первой в мире опытной установки (так называемой «Фабрики мишеней») для непрерывного пополнения криогенным водородным топливом зоны термоядерного горения реактора ИТС.

Ключевые слова: инерциальный термоядерный синтез (ИТС), водородное топливо, криогенная мишень, ультрадисперсный слой топлива.

CRYOGENIC HYDROGEN FUEL FOR CONTROLLED INERTIAL CONFINEMENT FUSION (REVIEW OF WORLD RESULTS)

I.V. Alexandrova¹, E.R. Koresheva^{1, 2}, O.N. Krokhin^{1, 2}, I.E. Osipov³

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

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

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

One of the major tasks in controlled inertial confinement fusion (ICF) now is the development of scientific, engineering and technological basis for mass production of cryogenic hydrogen fuel encapsulated in ICF targets. To demonstrate ICF as a power source, the targets must be accurately delivered to the focus of a power laser facility or ICF reactor at a rate of 1—10 Hz. In this paper, a comparative analysis of state-of-the-art in the world in the field of target fabrication and transport in the ICF systems is presented. The paper also summarizes the results of theoretical and experimental efforts in Russia and describes a unique free-standing (FST) fabrication technology, which can serve as a basis for ICF reactor fueling. Now there is an advanced scientific and technological groundwork for designing and building of the world's first target FST factory for a pilot ICF-plant with continuous delivery of the cryogenic hydrogen fuel into the ICF burn area.

Key words: inertial confinement fusion (ICF), hydrogen fuel, cryogenic target, ultrafine fuel layer.

ВВЕДЕНИЕ

На сегодняшний день использование энергии инерциального термоядерного синтеза (ИТС) является одной из приоритетных задач в рамках концепции устойчивого развития и перехода к альтернативным источникам энергии в базовой энергетике страны. Поэтому в современных исследованиях актуальной проблемой становится разработка энергетической станции на основе ИТС, которая могла бы обеспечить получение энергии за счёт реакций синтеза изотопов водорода — дейтерия и трития. Исходным топливом для термоядерного реактора служат вода и литий, запасы которых практически не ограничены.

В качестве источника энергии для нагрева и сжатия криогенной топливной мишени (полая полимерная оболочка со сферическим шаровым слоем криогенного водородного топлива на её внутренней поверхности) используется специальный драйвер — лазер, источник ионных пучков или Z-пинч. Отметим, что начало инерциальному подходу положила работа [1], в которой была показана принципиальная возможность применения излучения лазеров для нагрева плазмы до термоядерных температур. К на-

стоящему времени в ведущих лабораториях мира экспериментально показано, что при взаимодействии мощного лазерного излучения с микроскопической мишенью (менее одного кубического сантиметра) осуществляются реакции синтеза изотопов водорода и выделяется энергия термоядерного синтеза.

При разработке станции на основе ИТС (или реактора ИТС) наиболее сложные вопросы связаны с построением фабрики топливных мишеней и созданием мощных лазерных систем для частотного облучения мишени в камере реактора ИТС. В настоящее время в России существует хороший задел, необходимый для принятия государственной программы по ИТС. Следующие методы и технологии уже развиты в российских исследовательских центрах:

— в Физическом институте им. П.Н. Лебедева РАН (ФИАН) разработаны методы и технологии в области создания фабрики реакторных мишеней. Здесь создана уникальная технология FST (free-standing targets, или бесподвесная мишень) для поточного производства топливных мишеней и впервые создан прототип Фабрики мишеней, работающей с частотой 0,1 Гц, созданы и исследованы различные системы доставки мишеней, развиты технологии высокоточного контроля качества мишени. Часть этих работ выполнена в рамках 10 международных и российских проектов;

— в Национальном исследовательском центре «Курчатовский институт» (г. Москва) совместно с Политехническим университетом Санкт-Петербурга проведены исследования в области доставки криогенного топлива с помощью пневматического инжектора, которые уже сейчас используются в системах типа токамак, исследованы различные способы защиты топливных мишеней в процессе их доставки в камеру реактора ИТС, исследована возможность практического использования ИТС в качестве мощного источника нейтронов;

— Российский федеральный ядерный центр (г. Саров) обладает приоритетными наработками в области создания мощных лазерных систем (драйверов). В настоящее время в РФЯЦ—ВНИИЭФ реализуется программа УФЛ-2М построения самого мощного в мире лазера с энергией 2,8 МДж. В программе принимают участие и другие российские организации, в том числе Физический институт им. П.Н. Лебедева. Успешное выполнение программы УФЛ-2М, запланированное, по последним сведениям, на 2017 г., — это ещё один большой шаг России на пути освоения энергии инерциального термоядерного синтеза.

Подведём итог. Перспективы применения ИТС в энергетической отрасли нашей страны имеют хорошую научную и технологическую базу. Необходимыми условиями реализации развитых методов и технологий являются принятие долгосрочной программы по ИТС и её финансирование. Перспективная программа развития технологий массового производства и частотной доставки бесподвесных топливных мишеней была принята в России (в ФИАН) в 1999 г. [2]. На сегодняшний день Россия уже вошла в современный мировой календарный план в развитии энергетики на основе ИТС:

2008 г. МАГАТЭ. В резюме совещания МАГАТЭ по проблемам управляемого термоядерного синтеза сделано следующее заявление: «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) [3];

2008 г. Евросоюз [4]. Стартовал проект HiPER, целью которого является создание пилотного образца лазерной установки реакторного класса, работающей в частотном режиме облучения лазером топливных мишеней с частотой 1 Гц. Одна из задач проекта — построение соответствующей установки для производства мишеней;

2009—2011 гг. Россия, ФИАН [5, 6]. Для проекта HiPER осуществлено эскизное проектирование модуля, предназначенного для частотного формирования движущихся криогенных топливных мишеней по методу FST, который развит и запатентован в ФИАН и не имеет аналогов в мире;

2012 г. Россия, РФЯЦ—ВНИИЭФ (г. Саров) [7, 8]. Стартовал проект построения самого мощного в мире лазера с энергией 2,8 МДж (установка УФЛ-2М);

2009—2013 гг. Япония [9, 10]. В 2009 г. стартовала программа CANDY построения мини-реактора ИТС. В 2013 г. впервые продемонстрировано высокочастотное облучение лазером сферических оболочек из дейтерированного полимера, инжектированных в экспериментальную тестовую камеру при $T = 300$ К с частотой 1 Гц;

2013 г. США [11]. На установке NIF впервые продемонстрирована научная рентабельность ИТС при облучении мишеней с DT-топливом: энергия, выделенная за счёт термоядерных реакций, превзошла энергию, затраченную на сжатие топлива (достигнут нейтронный выход на уровне 10^{15});

2012—2013 гг. Россия, ФИАН [12]. Впервые предложено использовать эффект квантовой левитации высокотемпературных сверхпроводников (ВТСП) для позиционирования и транспорта топливных мишеней при их инжекционной доставке в камеру мощной установки и/или реактора ИТС. Проведена серия тестовых экспериментов, подтверждающих эффективность предложенного метода для построения криогенных транспортных систем на основе ВТСП для целей ИТС;

2014 г. Россия (ЦЭ Интер РАО ЕЭС—ФИАН—НИЦ «Курчатовский институт») [13]. Разработано предложение на проект по созданию прототипа Фабрики мишеней для высокочастотного пополнения топливом реактора ИТС (проект находится на рассмотрении в Министерстве образования и науки РФ). Возможность выполнения проекта основана на результатах 20-летних исследований ФИАН в области формирования и доставки бесподвесных криогенных топливных мишеней. Выполнение проекта позволит найти техническое решение ключевых элементов одного из четырёх основных блоков реактора ИТС и масштабировать существующие технологии на реакторный уровень.

Сделаем ряд пояснений по поводу Фабрики мишеней. Формируемые топливные мишени должны быть бесподвесными (т.е. свободными, незакреплёнными на каком-либо подвесе). Это является принципиальным условием, которое позволяет осуществить частотное формирование мишени и её доставку в фокус мощной лазерной установки или реактора. Для обеспечения непрерывного режима генерации энергии подача топлива в центр камеры реактора ИТС и одновременная подача туда лазерного излучения должны осуществляться с частотой 1—10 Гц.

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

СТРУКТУРА ТОПЛИВНОЙ МИШЕНИ ДЛЯ РАЗЛИЧНЫХ СХЕМ ИТС

Структура и параметры топливной мишени существенно зависят от энергии излучения, а также от схемы взаимодействия лазерного излучения с мишенью, в результате которого достигаются высокая плотность сжатия и нагрев топлива. Однако конструкции мишеней для различных схем взаимодействия имеют общий элемент — топливное ядро или полую сферическую оболочку, содержащую DT- или D_2 -топливо (рис. 1).

Рис. 1. Топливные мишени для трёх концепций облучения: *а* — прямое облучение; *б* — не прямое облучение; *в* — прямое зажигание; 1 — стенка оболочки; 2 — криогенный DT-слой; 3 — DT-пар; 4 — цилиндрический конвертер; 5 — направляющий конус

Для того чтобы взаимодействие пары лазер/мишень дало необходимый эффект, топливо внутри мишени должно сжиматься с высокой скоростью и при минимальной энтропии. Поскольку первая ударная волна плотностью ρ , движущаяся под действием давления P через топливо, вносит в вещество энтропию порядка $s \sim P/\rho^{5/3}$, следует использовать топливо с максимально возможной начальной плотностью, т.е. твёрдое. Как показали численные расчёты [14—16], именно мишени с криогенным топливным слоем позволяют реализовать любую схему ИТС с максимальной эффективностью.

В оптимальном варианте топливо образует сферически-симметричный твёрдый криогенный слой, расположенный на внутренней поверхности оболочки топливного ядра. В схеме прямого облучения этот элемент представляет собой собственно криогенную мишень (см. рис. 1, а).

Одной из центральных в ИТС является проблема устойчивости сферического сжатия при облучении мишени мощным лазерным излучением. Её решение непосредственно связано с другой задачей — реализацией сверхвысоких плотностей топлива (10^{24} — 10^{25} см⁻³), что является физической основой самоподдерживающейся термоядерной реакции. Результаты численного анализа показывают [17], что достижение требуемой симметрии сжатия зависит от точности изготовления термоядерной мишени и равномерности её нагрева.

В частности, при прямом облучении мишени параметры криогенного слоя должны удовлетворять следующим критериям качества [18]:

1. Отклонения от однородности по массе, сферичности и толщине: $Nu < 1\%$;
2. Шероховатость свободной поверхности: $\delta < 1$ мкм;
3. Температура на $\sim 1,5^\circ$ ниже тройной точки топлива.

Выполнение условий 1, 2, 3 позволяет снизить развитие гидродинамических неустойчивостей в процессе сжатия и избежать перемешивания холодного и горячего топлива в центральной зоне сжатой мишени (горячее пятно), т.е. получить в центре такие плотности и температуры, которые необходимы для зажигания самоподдерживающихся термоядерных реакций.

Достижение столь высокого качества криогенных мишеней фактически выделяет технологию их изготовления в специальное и довольно разветвлённое направление, поскольку физика процессов, лежащая в основе производства каждого слоя мишени, включая топливный, имеет существенно различную природу. Важным является и то обстоятельство, что исходное «несовершенство» мишени — начальная несферичность оболочки или неоднородность толщины слоя — не может быть выровнено за счёт процессов переноса энергии в плазме.

Мишень для прямого облучения. Как показали расчёты, энергия излучения лазера для получения требуемых плотностей топлива составляет $\sim 7,5$ МДж/г, а для получения требуемой температуры — не менее ~ 1200 МДж/г. Поэтому идея абляционного сжатия мишени с формированием горячего пятна, в котором сосредоточено лишь малое количество топлива, позволяет существенно снизить требования к энергии лазера.

Для того чтобы взаимодействие драйвер—мишень по схеме прямого облучения дало необходимый эффект, топливо внутри мишени должно сжиматься с высокой скоростью и при минимальной энтропии. Мишень для прямого облучения в простейшем случае представляет собой сферическую капсулу, внутри которой содержится топливо (см. рис. 1, а). Материал капсулы (обычно пластик либо бериллий) играет роль аблятора.

Основная масса топлива в мишени находится в конденсированном состоянии, образуя однородный сферический криогенный слой. Такая конфигурация обеспечивает минимизацию энтропии и получение высоких скоростей сжатия.

Расчёты, проведённые в ФИАН [19], показали, что при энергии лазерного излучения от 1,5 до 6 МДж схема прямого облучения мишеней с аспектным отношением $A \sim 100$ (A — отношение радиуса оболочки к толщине стенки) позволяет получить усиление по энергии от 15 до 110 раз.

В лабораториях США, Японии и России разработаны методы и созданы установки для изготовления топливных капсул, их заполнения газообразным топливом и формирования криогенного слоя. В ФИАН эти разработки ведутся, начиная с 1974 г. Здесь построен комплекс оборудования для создания мишеней

ИТС [20, 21]. На рис. 2, *а* показаны изготовленные в ФИАН полые сферические оболочки из полистирола диаметром от 0,8 до 1,8 мм, а также типичная криогенная мишень прямого облучения, рассчитанная на энергию лазера ~ 15 кДж. Эта мишень представляет собой полистироловую оболочку диаметром 980 мкм, содержащую 20,5 мкг D_2 -топлива в виде криогенного сферического слоя толщиной 40 мкм.

Рис. 2. Мишени для схемы прямого облучения: *а* — мишени производства ФИАН для лазерной установки с $E_{\text{л}} \sim 15$ кДж, массив оболочек из полистирола ($\varnothing = 0,8\text{—}1,8$ мм) и криогенная мишень, оболочка из полистирола $\varnothing = 0,98$ мм, содержащая 20,5 мкг D_2 -топлива в виде криогенного сферического слоя толщиной 40 мкм; *б* — мишень для лазерной установки OMEGA ($E_{\text{л}} \sim 30$ кДж), оболочка из полистирола $\varnothing = 0,92$ мм, содержащая 55 мкг DT-топлива в виде криогенного сферического слоя толщиной 95 мкм; *в* — мишень «Боднера» (0,3—0,5 мг топлива) для реактора SOMBRERO, $E_{\text{л}} \sim 1,3$ МДж

В центральной сферической полости криогенной мишени находится некоторое количество газообразного топлива (в виде насыщенного пара), причём давление P , а значит, и плотность ρ этого газа однозначно определяются температурой T криогенного слоя. Эмпирическая зависимость имеет вид [22] $\lg P = a + b/T + cT$, где a , b и c — константы, характерные для данного изотопа водорода.

Количество газа в центре должно быть достаточным для формирования горячего пятна. В частности, количество DT-газа, соответствующее оптимальному значению плотности $0,3 \text{ мг/см}^3$ [23], достигается при температуре топливного слоя $T_{\text{опт}} \sim 17,9 \text{ К}$, что на $1,8^\circ$ ниже тройной точки DT-топлива ($T_{\text{тр}} = 19,7 \text{ К}$).

На рис. 2, *б* показана схема мишени прямого облучения для 30-килоджоульной лазерной установки OMEGA, действующей в Лаборатории лазерной энергетики, США [24]. Мишень представляет собой сферическую полистироловую оболочку диаметром 0,92 мм с толщиной стенки 3 мкм, содержащую твёрдый DT-слой толщиной 95 мкм.

В общем случае мишень для прямого облучения включает несколько сферических слоёв, позволяющих оптимизировать процесс имплозии (сжатия) с целью получения максимального энергетического выхода. Например, так называемая мишень «Боднера» (рис. 2, *в*) предназначена для получения высокого выхода ~ 125 МДж на установке с KrF-лазером при энергии лазера 1,3 МДж [25]. Внешний диаметр мишени составляет 4 мм. Мишень включает несколько слоёв, в том числе:

- слой золота толщиной 0,03 мкм, который защищает внутренние части мишени от воздействия излучения стенок камеры реактора;
- следующий, полимерный (CH), слой толщиной 1 мкм выполняет роль аблятора в процессе взаимодействия лазерного излучения с веществом мишени;
- пористый полимерный слой, насыщенный жидким DT-топливом (толщина слоя 289 мкм); этот слой позволяет замедлить развитие рэлей-тейлоровских неустойчивостей в процессе абляционного сжатия, а также удерживает в своих порах значительное количество конденсированного топлива;

- равнотолщинный криогенный DT-слой толщиной 190 мкм;
- внутренняя полость (радиус 1500 мкм), содержащая DT-пар.

Эксперименты с криогенными мишенями прямого облучения в настоящее время осуществляются, в основном, на 60-канальной лазерной установке OMEGA [26, 27].

Схема прямого облучения является технически наиболее доступной при осуществлении частотного взаимодействия пары драйвер—мишень в реакторе ИТС.

В заключение этого раздела отметим так называемую схему *shock ignition*, или ударный поджиг, в которой оболочечная криогенная мишень сферически-симметрично облучается и сжимается специально профилированным лазерным импульсом [28]. Ожидается, что схема ударного поджига позволит в 2—3 раза снизить энергию лазера, необходимую для реализации условия брейквен (*breakeven*), т.е. условия, при котором количество вложенной энергии лазера равно количеству энергии, выделившейся в результате термоядерного синтеза. В частности, в европейском проекте HiPER запланированы эксперименты по частотному облучению мишеней по данной схеме [4, 29]. В ФИАН при партнерском участии Совета научно-технических ресурсов (Великобритания) для реализации экспериментов на установке HiPER разработано устройство FST-SS-HiPER, обеспечивающее непрерывное формирование и доставку криогенных мишеней в камеру взаимодействия установки HiPER с частотой 1—10 Гц [6]. Работа отдельных элементов устройства продемонстрирована в лабораторных экспериментах.

Мишень для прямого зажигания. При стандартном подходе, реализуемом в схеме прямого облучения, сжатие и поджиг топлива — взаимосвязанные процессы. Жёсткие требования к симметрии сжатия являются следствием этой взаимосвязи. Кроме того, образование горячего пятна в центре — это гидродинамически нестабильный процесс.

Концепция прямого зажигания (или *fast ignition*, т.е. быстрое зажигание) позволяет проводить процессы сжатия и поджига топлива независимо друг от друга и, таким образом, избавиться от указанных недостатков схемы прямого облучения. Схема мишени для прямого зажигания показана на рис. 1, в. Детальный обзор результатов современных исследований в области прямого (или быстрого) зажигания топливных мишеней ИТС дан в работе [30].

Концепция прямого зажигания состоит в разделении процессов сжатия и зажигания топлива за счёт синхронизованного воздействия различных драйверов. Теоретические расчёты показали, что пороговая энергия для осуществления условия брейквен в этой схеме составляет $E_d \sim 100$ кДж [31], т.е. на порядок меньше, чем в схеме с прямым облучением топливной мишени.

Параметры горячего топливного пятна при прямом зажигании контролируются внешним источником. Поэтому возникает вероятность зажигания чистого D₂-топлива, когда инициация происходит в некоторой области с малым содержанием радиоактивного DT-компонента. Кроме того, требования к симметрии сжатия здесь существенно ниже. Все эти аргументы делают схему прямого зажигания весьма привлекательной. Несмотря на то, что идея прямого зажигания обсуждается с начала 1960-х годов [32], серьёзные исследования в этой области начаты сравнительно недавно, с момента появления требуемых для зажигания петаваттных лазеров. Эти исследования в настоящее время ведутся во многих лабораториях мира [30, 33—46]. Однако до сих пор вопрос о том, какова должна быть оптимальная геометрия данной схемы, остаётся открытым. В частности, рассматриваются следующие варианты подведения энергии к области сжатого топлива.

1. Импульс зажигания от мощного петаваттного лазера «буравит» канал в плазменной короне сжатого топлива [31, 33, 34]. В канале часть лазерной энергии переходит в энергию релятивистских электронов, движение которых совпадает с направлением распространения лазерного луча. Электроны переносят энергию импульса через сверхплотную плазму и создают «горячее пятно» для зажигания топливного ядра. В этой схеме энергия 10—100 кДж должна быть выделена за время порядка 10 пикосекунд.

2. С помощью мощного короткого лазерного импульса, падающего на тонкую мишень-генератор, формируется пучок ионов с параметрами, достаточными для прямого зажигания предварительно сжатого термоядерного вещества сферической мишени [35].

3. Применение конуса из материала с тяжелым Z , встроенного в сферическую топливную капсулу с криогенным DT-слоем, позволяет лазерному лучу подойти близко к плотному ядру (рис. 3, *а*, взят из работы [36]). Ожидается, что в этой схеме высокоэнергетичные заряженные частицы, такие, как электроны [37, 38] или протоны [39, 40], возникающие при взаимодействии лазерного излучения с материалом конуса, транспортируются в сжатое ядро DT-топлива и нагревают его до температуры зажигания (5 кэВ).

Рис. 3. Мишени для прямого поджига: *а* — схема расположения криогенной мишени с встроенным конусом внутри криостата со сдвигивающимся экраном; *б* — конструкция мишени и схема её заполнения жидким топливом (вверху фотография пористой полимерной капсулы с встроенным конусом, изготовлено в Институте лазерной техники Осацкого университета, Японии [44]); *в* — мишень для схемы ударного прямого поджига [42]; *г* — мишень для прямого поджига: капсула из дейтерированного полиэтилена с встроенным конусом из золота (мишень была использована в лазерных экспериментах [43] в Институте лазерной техники Осацкого университета)

Заметим, что концепция нагрева предварительно сжатого топлива с помощью излучения мощного лазера, вводимого в мишень через встроенный в неё конус, была впервые предложена Л.П. Феоктистовым в 1985 г. [41].

4. В оригинальной схеме ударного прямого зажигания (impact fast ignition) [42] основная часть сжатого DT-топлива нагревается выше 5 кэВ и зажигается за счёт соударения с другой частью топлива, ускоренной с помощью петаваттного лазерного излучения до скорости 10^8 см/с. Мишень состоит из двух компонентов (см. схему на рис. 3, *б*): сферической оболочки-аблятора с замороженным на её внутренней поверхности DT-слоем и полый конической мишени, встроенной в сферическую оболочку. Конический элемент так же, как и сферический, состоит из аблятора (например, из пластика) и замороженного DT-слоя.

Концепция прямого зажигания вызывает оптимизм в связи с экспериментами, выполненными в Институте лазерной техники Осацкого университета [43, 44]. В этих экспериментах сферическая мишень из дейтерированного полиэтилена (CD_2) с встроенным конусом из золота (см. рис. 3, *г*) облучалась с помощью девяти лазерных пучков (длительность импульса 1 нс, длина волны 0,53 мкм, полная энергия излучения 1,5 кДж) до получения высокой плотности сжатия, после чего осуществлялся поджиг сжатой CD-плазмы с помощью одного лазерного луча мощностью 100 ТВт (длительность импульса 0,8 пс, длина волны 1,054 мкм, полная энергия 0,1 кДж). В результате реализации схемы прямого зажигания температура плотной плазмы поднялась на 1% от той величины, которая необходима для начала термоядерной реакции. Энергии при этом было затрачено около 0,1% от теоретически рассчитанной величины. В результате этих экспериментов получен в 10 раз больший нейтронный выход из плотной CD-плазмы, чем в экспериментах по прямому сжатию. Таким образом, первые модельные эксперименты подтвердили эффективность применения схемы прямого зажигания по сравнению с классической схемой прямого облучения.

В экспериментах [45, 46], проведённых в Лаборатории лазерной энергетики США в 2012—2013 гг., с использованием 54 лучей лазера OMEGA ($E_{\text{л}} = 18$ кДж, профилированный импульс длительностью 2,7 нс) сжимали по схеме прямого облучения оболочечную мишень со встроенным конусом. Далее луч лазера OMEGA EP интенсивностью $\sim 10^{19}$ Вт·см $^{-2}$ (длительность импульса 10 пс) фокусировался внутрь

конуса в момент, когда топливо достигало максимального сжатия. Целью экспериментов являлось детальное изучение процессов, влияющих на эффективность взаимодействия излучения пикосекундного лазерного импульса с плотным топливным ядром. Обнаружено, что около 1% энергии излучения от короткого импульса OMEGA EP (около 10 Дж) расходуется на ускорение протонов. Эти потери снижают эффективность схемы прямого зажигания. Также обнаружено, что температура «горячих» электронов составляет 500—900 кэВ, что в 2—3 раза выше, чем предсказано теорией [47].

Несмотря на большое количество результатов последних лет, исследования в области способа прямого зажигания далеки от завершения и возможность его практической реализации в реакторах ИТС ещё окончательно не ясна.

Мишень для непрямого облучения. В схеме прямого облучения для реализации необходимой высокой симметрии сжатия используется большое количество пучков. Например, в установке OMEGA лазерное излучение доставляется к поверхности мишени с помощью 60 пучков. Причём природа лазерного излучения требует применения дополнительных технологических приёмов, связанных с подавлением когерентности излучения с целью достижения высокой однородности облучения.

В схеме прямого поджига предполагается, что предварительное сжатие достигается за счёт симметричного облучения топливной капсулы несколькими пучками лазера (т.е. так же, как и в схеме прямого облучения).

В концепции непрямого облучения сферическое сжатие топливного ядра происходит под действием вторичного рентгеновского излучения, которое весьма однородно и некогерентно. Причём для его получения достаточно облучить мишень только с двух сторон (для мишеней с цилиндрическим конвертером, см. рис. 1, б).

Мишень для непрямого облучения состоит из оболочки — конвертера излучения (полая сфера или цилиндр из материала с высоким Z) и сферического топливного ядра, расположенного внутри конвертера [15, 48—54].

На рис. 4, а показана принципиальная конструкция мишени, с помощью которой осуществляются попытки реализовать схему непрямого облучения на 2-мегаджоульной лазерной установке NIF. Заме-

Рис. 4. Мишени для схемы непрямого облучения: а — принципиальная схема мишени для непрямого облучения на лазерной установке NIF (США); б — принципиальная схема мишени для непрямого облучения с помощью тяжёлоионных пучков; в — реальная схема (вверху) и фотография (внизу) криогенной мишени для непрямого облучения

тим, что реальная конструкция такой мишени значительно сложнее (см. фото на рис. 4, б). Это связано прежде всего с необходимостью применения топлива в криогенном состоянии, а также с принятой технологией позиционирования мишени в центре камеры облучения (мишень, укрепленная на специальном держателе).

При облучении мишени с двух противоположных сторон на оси цилиндра происходит следующее. Внутренняя поверхность цилиндрической оболочки, изготовленной из золота (или другого материала с высоким Z), разогревается лазерным излучением, входящим в полость цилиндра через отверстия, расположенные на двух противоположных торцах цилиндра. В результате взаимодействия лазерного излучения с материалом стенки образуется тонкая область высокотемпературной плазмы, в которой происходит конверсия лазерного излучения в рентгеновское. Именно под действием рентгеновского излучения топливное ядро абляционно сжимается (по той же схеме, что и в прямом облучении). Процессы множественной абсорбции и переизлучения в материале стенки приводят к тому, что распределение тепловых фотонов в полости описывается согласно закону Стефана—Больцмана для излучения абсолютно чёрного тела, которое, по определению, является однородным и изотропным. Поэтому конверсия в рентгеновское излучение позволяет избежать когерентности лазерного излучения и связанной с ним неоднородности облучения.

На рис. 4, в показана схема мишени для непрямого облучения с помощью тяжёлоионных пучков. Дизайн мишени предложен в рамках программы HYDIF, целью которой является создание тестовой реакторной установки [52, 53]. Ионные пучки падают на два противоположных торца мишени под углом 30° к оси цилиндра и передают энергию конвертеру из пористого бериллия, содержащего малые добавки золота. Два конических экрана из золота, расположенные на концах конвертера, предохраняют топливную капсулу от прямого облучения пучками. В конструкции также предусмотрены кольцевые экраны из золота, которые служат для симметризации излучения.

Использование схемы непрямого облучения позволяет на порядок снизить требования к допустимой шероховатости топливного слоя (по сравнению с прямым облучением), однако изготовление рентгеновской мишени — процесс более сложный и трудоёмкий, а следовательно, и более дорогостоящий, чем изготовление мишени прямого облучения.

Так же, как и в случае прямого зажигания, практическая реализация схемы непрямого облучения в реакторах ИТС, т.е. при синхронизованном частотном взаимодействии пары драйвер—мишень, представляется на сегодняшний день технически более трудноосуществимой задачей, чем по схеме прямого облучения.

ПРОБЛЕМА СОХРАНЕНИЯ КАЧЕСТВА ТОПЛИВНОЙ МИШЕНИ

Проблема использования криогенных мишеней для целей ИТС включает в себя задачу не только получения криогенного слоя топлива требуемого качества, но и сохранения его параметров вплоть до прихода на поверхность мишени импульса лазерного излучения.

Особенностью криогенного топлива является его высокая чувствительность к изменению внешних условий, что может привести к потере качества слоя (т.е. к появлению разнотолщинности и шероховатости слоя сверх допустимого уровня) при доставке и позиционировании мишени в зоне облучения. Поэтому либо топливный слой в мишени должен обладать устойчивостью к вариации внешних условий, либо надо проводить формирование слоя непосредственно перед моментом облучения мишени, заранее размещённой на держателе в оптическом фокусе лазерной термоядерной установки. Последнее представляет собой общепринятый подход при проведении лазерных экспериментов, начиная с 1977 г. вплоть до настоящего времени [27, 55—59]. Этот подход породил и особую технологию формирования слоя в единичной мишени, укрепленной на держателе.

Как правило, между расчётными результатами и данными лазерного эксперимента с криогенными мишенями наблюдаются значительные расхождения [60]. Одна из важнейших причин этих расхождений — наличие контактов мишени с держателем, что приводит к нарушению симметрии сжатия.

В настоящее время исследования в области инерциального синтеза перешли на новую стадию развития, связанную с использованием ИТС в качестве альтернативного источника энергии [60—64].

Для работы реактора ИТС топливные мишени должны доставляться в зону термоядерного горения с частотой 1—10 Гц, что возможно осуществить только для незакреплённых (бесподвесных) мишеней. Это, в свою очередь, требует разработки технологии непрерывного/массового производства бесподвесных криогенных мишеней и их частотной доставки в камеру реактора с помощью инжектора. Основные проблемы, которые предстоит решить при инжекции мишеней в камеру реактора, следующие [64]:

- сохранение качества мишени в процессе её доставки в зону горения;
- высокая точность доставки мишени в фокус лазерной установки (± 20 мкм);
- работа инжектора при криогенных температурах с частотой подачи мишеней 1—10 Гц;
- синхронный приход в зону горения мишени и импульса излучения, или, другими словами, создание синхронизированной пары драйвер—мишень;
- решение технических проблем, связанных со стыковкой элементов, таких, как «модуль формирования—инжектор» и «инжектор—камера реактора», в условиях, минимизирующих теплопритоки на криогенную мишень и загрязнение камеры.

Сравнительный анализ возможности применения в реакторе электромагнитных и пневматических инжекторов проведён в работе [65]. Проблемы ускорения и инжекции мишеней при использовании электромагнитных инжекторов экспериментально изучены в ряде работ японских исследователей [66—68]. Возможность использования в реакторах ИТС пневматических инжекторов, применявшихся ранее в системах для магнитного удержания, изучена в США и Японии [69—71]. Разработки инжекторов гравитационного и электромагнитного типа для применения в технологии и доставки лазерных мишеней осуществляются в ФИАН с 1983 г. [72—89].

Важнейшим элементом устройства доставки является специальный носитель мишени, так называемый «сабот» (sabot), который выполняет двойную функцию в процессе ускорения мишени в инжекторе: передаёт импульс движения на мишень и предохраняет мишень от механических и тепловых перегрузок. С целью снижения рисков разрушения мишени при доставке в исследованиях ФИАН большое внимание уделяется оптимизации формы и материала сабота [12, 80—82, 85—87]. Для случая электромагнитного ускорения нами исследованы следующие материалы сабота: мягкие ферромагнетики (МФМ), композиты типа магнитодиэлектрик (КМД), высокотемпературные сверхпроводники (ВТСП), а также сочетание МФМ—ВТСП и КМД—ВТСП.

Отметим, что в настоящее время в мире только ФИАН обладает опытом в области ускорения и инжекции лазерных термоядерных мишеней при криогенных температурах. Здесь также проведены исследования в области создания системы синхронизации прихода в лазерный фокус мишени и импульса лазерного излучения, а также исследованы различные способы коррекции траектории летящей мишени [82, 83, 85]. Один из подходов — коррекция траектории мишени со сверхпроводящим покрытием с помощью магнитной линзы. Идея подобной коррекции для случая покрытия из свинца (низкотемпературный сверхпроводник 1-го рода, $T_c = 7,2$ К) впервые высказана в работах [90, 91].

В ФИАН было предложено использовать эффект квантовой левитации ВТСП в магнитном поле для позиционирования и транспортировки бесподвесной криогенной мишени. В 2012—2014 гг. здесь впервые в мире была осуществлена серия криогенных экспериментов и получены следующие уникальные результаты [12, 85, 86]:

1. Продемонстрирована возможность позиционирования и транспортировки бесподвесной криогенной мишени (без покрытия) с помощью платформы из ВТСП при криогенных температурах (80 К и $T \leq 18$ К) (рис. 5, 6, *а*);

Рис. 5. Транспорт полимерной оболочки на платформе из ВТСП

Рис. 6. Использование эффекта левитации для позиционирования бесподвесных мишеней: *а* — позиционирование в магнитном поле оболочки, лежащей на ВТСП-подложке; *б* — левитация в магнитном поле оболочки с внешним ВТСП-покрытием. Материал ВТСП — $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{6+x}$; материал оболочки — полистирол, $\varnothing 1,8$ мм, магнитное поле 0,4 Тл

2. Разработана уникальная технология нанесения ВТСП-покрытия на внешнюю поверхность полимерных оболочек;

3. Для мишеней с покрытием из порошка ВТСП на основе керамики $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{6+x}$ успешно продемонстрирована устойчивая левитация в магнитном поле при температурах 5,5—18 и 80 К (см. рис. 6, *б*). Полученные результаты показывают, что ВТСП является одним из перспективных материалов для применения в области позиционирования и доставки бесподвесных криогенных мишеней. Дальнейшая работа в этом направлении продолжается в ФИАН.

Предположим, что мы изготовили криогенную мишень идеального качества. Однако в процессе доставки в зону облучения реактора мишень подвергается негативным внешним воздействиям (тепловые и механические нагрузки). Колебания давления насыщенного пара во внутренней полости топливного ядра, появление шероховатости и разнотолщинности криогенного слоя, его растрескивание, процессы собирательной рекристаллизации и др. могут серьезно ухудшить качество топливного слоя и, соответственно, условия зажигания.

Вопрос создания эффективных средств защиты мишени — одна из актуальных задач в международной реакторной программе. Решение этой задачи ведётся интенсивно во многих лабораториях мира, в том числе и в России. Один из приёмов — введение дополнительных защитных слоёв (отражающих, теплоизолирующих) в конструкцию мишени [92]. Для защиты мишени от «лобового ветра» из остаточных газов при её полёте внутри камеры реактора предлагается использовать защитную крышку-экран, изготовленную из твёрдого дейтерия или другого отверждённого газа [80, 81, 93]. Однако важнейшим условием сохранения качества мишени является устойчивость самого топливного слоя по отношению к внешним воздействиям.

Таким образом, в программе построения реактора инжектор становится необходимым элементом системы доставки топлива в зону горения, а сохранение качества топливного слоя в этом процессе — непременным условием устойчивой работы реактора.

СОВРЕМЕННЫЕ МЕТОДЫ ФОРМИРОВАНИЯ КРИОГЕННЫХ ТОПЛИВНЫХ МИШЕНЕЙ, ПРЕДНАЗНАЧЕННЫХ ДЛЯ ДЕМОНСТРАЦИИ ТЕХНИЧЕСКОЙ РЕНТАБЕЛЬНОСТИ ИТС

Для демонстрации энергии термоядерного синтеза, получаемой по схеме ИТС, во многих странах мира построены опытные лабораторные установки. Наиболее мощные среди них следующие:

— в США (Лоуренсовская ливерморская национальная лаборатория) с 2009 г. действует лазерная установка NIF с энергией лазера 1,8 МДж, сосредоточенной в 192 пучках лазерного излучения [94—96];

— во Франции введена в действие мощная установка LMJ с энергией лазера 1,8 МДж в 240 пучках лазерного излучения [97, 98];

— в Евросоюзе создаётся мощная установка HiPER с энергией лазера 0,3—0,5 МДж, функционирование которой потребует производства и доставки топливных мишеней с высокой частотой ≥ 1 Гц [4]. Облучение мишеней будет осуществляться по режиму ударного сжатия, а также по режиму с прямым поджигом;

— в Лаборатории лазерной энергетики США действует лазерная установка OMEGA UPGRADE. Энергия лазера 30 кДж в 60 пучках лазерного излучения [26, 27, 57, 99];

— в России, в РФЯЦ—ВНИИЭФ действуют установки ИТС ИСКРА-5 (12 пучков лазерного излучения) и ЛУЧ (4 пучка лазерного излучения) [100, 101]. Энергия лазера в этих установках составляет 12—15 кДж. Здесь же в 2012 г. начато строительство новой установки УФЛ-2М с энергией лазера 2,8 МДж в 192 пучках. Создание и испытание первого лазерного модуля запланировано на 2017 г. [7, 8]. Полномасштабный запуск и эксплуатация этого самого мощного в мире лазера начнутся в 2020 г.;

— в Военно-морской лаборатории США построен самый мощный в мире криптон-фторовый лазер NIKE с энергией от 3—5 кДж в 56 пучках лазерного излучения [102];

— в Японии в Лаборатории лазерной техники Осацкого университета действует многопучковая лазерная установка GEKKO-XII. Энергия лазера 15—30 кДж [103];

— в Китае действует установка SG-III с энергией лазера 200 кДж в 64 пучках лазерного излучения [104].

Целью работы перечисленных установок является демонстрация технической рентабельности ИТС (breakeven), когда энергия, выделившаяся в термоядерных реакциях, равна всей вложенной энергии. К настоящему времени продемонстрирована научная рентабельность ИТС (scientific breakeven): энергия, выделившаяся в термоядерных реакциях, превзошла энергию, вложенную в сжатие и нагрев топлива. Эти результаты достигнуты в сентябре 2013 г. на установке NIF (США) при облучении криогенных мишеней по схеме непрямого сжатия [11].

В соответствии с существенным увеличением энергии облучения изменились и требования к параметрам криогенных мишеней. Сейчас это оболочки из полимера или бериллия диаметром 1—3 мм, содержащие твёрдый D₂- или DT-слой толщиной от 95 до 350 мкм.

Рис. 7. Параметры криогенных мишеней, предназначенных для прямого облучения на мощных лазерных установках и в реакторе ИТС (CHGT-1, CHGT-2 — мишени для реактора)

Параметры мишеней для некоторых мощных установок ИТС показаны на рис. 7. Как видно на рисунке, количество топлива в мишени таково, что при комнатной температуре его давление внутри мишени может достигать от 100 до 1000 атм. Очевидно, что такое давление просто разорвёт топливную оболочку, сделанную из пластика. Единственная возможность сохранить оболочку целой — это сконденсировать топливо внутри неё. Разрушения оболочки не произойдёт, поскольку давление насыщенных паров над поверхностью конденсата достаточно мало. В частности, в тройной точке давление насыщенных паров составляет ~0,19 атм. (DT) и ~0,17 атм. (D₂).

Таким образом, использование топлива в конденсированном состоянии не только обеспечивает оптимальный режим сжатия мишени, но и является единственной практической возможностью реализации современного лазерного эксперимента.

Поэтому разработка методов формирования толстого криогенного слоя, удовлетворяющего требованиям качества, — неперенное условие дальнейшего развития программы ИТС. Обзор современных методов получения криогенного слоя внутри полых оболочек дан в работе [105].

Традиционный подход к решению данной проблемы связан с получением твёрдого топлива в равновесном кристаллическом состоянии. К сожалению, существует целый ряд особенностей, которые делают кристаллический слой малоприспособленным для целей эксперимента ИТС. Рассмотрим эти особенности.

Соблюдение условия изотермичности очень важно для получения однородного гладкого слоя. Первые опыты по вымораживанию изотопов водорода на внутренней стенке оболочки показали, что при затвердевании жидкого слоя на неизотермической поверхности образуется крупнозернистый кристаллический слой [73, 74, 106]. Скорость охлаждения оболочки при этом составляла 10^{-3} — 10 К/с. Процесс образования крупнозернистого слоя показан на рис. 8. На рис. 9, взятом из работы [107], показана характерная структура твёрдого D_2 -слоя, образующаяся вблизи тройной точки вещества при медленном охлаждении.

Рис. 8. Вымораживание водорода (H_2) на внутренней стенке полимерных оболочек при их охлаждении ниже тройной точки H_2 ($T_{тр} = 13,96$ К). Диаметр оболочек ~ 1 мм; давление заполнения 205 атм. H_2 ; теплоотвод осуществляется через пятно контакта: 1 — 30 К, в оболочке H_2 — газ; 2 — 15 К, в оболочке жидкий H_2 ; 3 — 13 К, в оболочке твёрдый H_2

Рис. 9. Характерная структура твёрдого D_2 -слоя, образующаяся вблизи тройной точки вещества при скорости охлаждения ~ 1 мК/с

Наблюдаемое в экспериментах появление в криогенном слое неоднородностей типа сферолитов, дендритов, а также различных ячеистых, игольчатых, пластинчатых и других структур характерно, когда процесс кристаллизации происходит в неоднородном температурном поле. В этом случае возмущение свободной поверхности слоя значительно превышает допустимую норму. На рис. 10 показаны характерные типы крупнозернистых структур, сформированных внутри оболочек.

Один из способов снижения шероховатости поверхности предполагает применение теплового потока, проходящего через поверхностный слой [49]. Однако такое «выглаживание» имеет слишком большую временную константу (5—8 ч). Кроме того, снятие теплового воздействия приводит к тому, что шероховатость слоя нарастает за счёт процессов рекристаллизации.

Если кристаллизация начинается с единичной затравки и происходит в максимально однородном температурном поле (когда вариации температуры на внешней поверхности

Рис. 10. Характерная структура криогенного слоя, вымороженного на внутренней поверхности оболочек при скорости охлаждения ~ 1 К/мин (максимальный перепад температуры вдоль поверхности оболочки $\sim 2^\circ$): 1, 2, 3 — H_2 при 12 К (средняя толщина слоя, $W_{av} = 3$ мкм); 4 — эквимольная смесь H_2/D_2 при 10 К ($W_{av} = 30$ мкм); 5 — H_2 при 13,5 К ($W_{av} = 54,4$ мкм); 6 — D_2 при 16 К ($W_{av} = 40$ мкм)

составляют менее 1—3 мК) и при очень медленном темпе теплоотвода, то на внутренней поверхности оболочки удаётся вырастить прозрачный монокристалл с атомарно гладкой поверхностью. Возможность получения криогенного слоя такого качества была продемонстрирована в работах [49, 99], при этом скорость теплоотвода составляла менее 0,1 мК/с.

Одновременно с процессом выращивания твёрдого монокристалла на сферической стенке осуществляется его выравнивание по толщине с помощью метода IR-redistribution [108, 109] (для D₂-топлива) либо способом β -layering (для DT-смеси) [110].

В методе β -layering, в качестве механизма выравнивания по толщине твёрдого DT-слоя используется тепло, выделяющееся в процессе β -распада трития (0,977 Вт/моль). Все, что необходимо для реализации метода, — это выдерживание оболочки с топливом в изотермических условиях при температуре ниже температуры замерзания топлива. В этом случае из-за большего выделения тепла в объёме толстой области DT-слоя её поверхность будет более нагрета, чем поверхность тонкой области. Вещество испаряется (сублимирует) с более нагретой и конденсируется в менее нагретой области на поверхности слоя. Процесс выравнивания толщины имеет экспоненциальный характер, поскольку по мере выравнивания слоя градиент температуры на его поверхности снижается. Кроме того, постоянная времени процесса перераспределения топлива линейно возрастает по мере старения DT, поскольку выделение гелия-3 при β -распаде трития затрудняет диффузию молекул DT в объёме оболочки. Постоянная времени также существенно возрастает с понижением температуры. Вследствие большой временной константы процесса выравнивания эффективный объём паразитного трития в системе достаточно велик, что является существенным недостатком метода в приложении к реакторам.

Метод IR-redistribution основан на эффекте резонансного поглощения ИК-излучения изотопами водорода. Оболочка с криогенным слоем помещается в изотермическую камеру. Излучение фокусируется на мишень и поглощается материалом криогенного слоя, который в результате нагревается. При этом так же, как и в методе β -layering, толстая область становится более нагретой, а тонкая — менее нагретой, в результате чего происходит перераспределение вещества и выравнивание слоя по толщине. Так же, как и в методе β -layering, процесс выравнивания имеет экспоненциальный характер.

Согласно измерениям [111] характерная константа времени выравнивания DT-слоя по толщине (в области, близкой к тройной точке) составляет 28 мин. Однако поскольку процесс выравнивания слоя происходит с экспоненциальным затуханием, то полное время получения слоя с разнотолщинностью менее 1% составляет около суток.

Как отмечается в работе [112], столь медленный процесс приготовления твёрдого слоя увеличивает вероятность разделения топливной смеси за счёт ректификации и термодиффузии и ужесточает требования к изотермичности стенки камеры формирования. Чтобы избежать разделения смеси, требуется, чтобы градиент составлял не более 1 мК/мм, что является сложной технической проблемой.

Таким образом, данная технология не может быть использована для массового производства мишеней.

Кроме того, область температурного существования полученной структуры весьма ограничена. Например, слой из D₂ сохраняет свою прозрачность и однородность только до температуры 17,1 К. При более глубоком охлаждении в слое топлива и на его поверхности под воздействием температурных напряжений появляются трещины и дефекты.

Рис. 11. DT-слой через 17 ч после отвердевания

Еще более ограничена область существования монокристалла из DT-смеси: слой растрескивается при охлаждении до 19,4 К, т.е. при температуре всего на 0,3 К ниже тройной точки. Аномально низкая устойчивость DT-слоя к охлаждению связана с наличием большого числа пузырьковых дефектов, которые накапливаются с течением времени [112]. Этот процесс является следствием выделения газообразного ³He при β -распаде трития. На фотографии криогенной мишени, сделанной через 17 ч после отвердевания DT-слоя, эти дефекты хорошо видны (рис. 11, взят из работы [112]). Так как полное время изготовления высококачественного монокристаллического слоя достаточно велико (около сут), то избежать появления заметных дефектов в DT-слое невозможно. Поскольку процесс β -распада трития в DT-топливе прин-

ципиально неизбежен, необходимо найти условия, которые позволят формировать топливный слой за короткое время.

Отметим, что в равновесном кристаллическом состоянии твёрдые изотопы водорода представляют собой анизотропную среду. Проявлением анизотропии является, например, зависимость скорости распространения звука от направления [113]. Поэтому даже в условиях симметричного теплопритока на мишень в процессе её доставки на внутренней поверхности поликристаллического слоя будет возникать температурный градиент, который инициирует процесс переноса молекул вещества в область наименьших температур и приводит к образованию разнотолщинности и локальных неоднородностей. Если же топливный слой представляет собой изотропную среду, данный механизм теплового разрушения слоя не реализуется.

РЕАКТОРНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

В XXI веке в развитых странах мира приняты национальные программы построения реактора на основе ИТС [114—116]. В программах США, Европы и Японии предполагается построение к 2040 г. опытной электростанции ИТС. Планируется, что выход на оптимальные технологии произойдет к 2015—2018 гг., а демонстрация работы пилотной установки в непрерывном режиме выработки электроэнергии — к 2020—2025 гг.

Напомним, что для обеспечения непрерывного режима генерации энергии подача топлива в центр камеры реактора ИТС и одновременная подача туда лазерного излучения должны осуществляться с частотой 1—10 Гц.

В Военно-морской лаборатории (NRL) США для отработки реакторных технологий создана установка ELEKTRA, действующая с частотой 5 Гц при энергии лазера 500—700 Дж [117]. К 2020 г. планируется увеличить энергию лазера в 1000 раз.

Мощная опытная установка ИТС с энергией 0,3—0,5 МДж, которая будет работать в частотном режиме, создаётся в рамках европейского проекта HiPER [4]. Цель этой программы — демонстрация возможности получения энергии термоядерного синтеза в частотном режиме, как это характерно для работы инерциальной термоядерной энергетической станции.

В США существует долгосрочная программа LIFE, нацеленная на построение к 2040 г. первой электростанции ИТС [118, 119]. Программа LIFE будет развиваться на основе действующей в США мощной лазерной установки NIF с энергией лазера 1,8 МДж.

В Японии успешно развивается государственная программа FIREX, основанная на схеме прямого зажигания криогенных топливных мишеней [120]. Кроме того, при финансировании ряда крупных предприятий (Hamamatsu Photonics, Toyota и др.) в 2009 г. стартовала программа CANDY, нацеленная на создание мини-реактора ИТС [10], предназначенного для отработки и демонстрации реакторных технологий.

В России (ФИАН) разработан и продемонстрирован уникальный метод FST, который является перспективным путём решения проблемы частотного формирования и доставки криогенных топливных мишеней в реактор ИТС [83, 121]. Здесь также создано лабораторное оборудование, которое моделирует весь процесс приготовления реакторной мишени — от её заполнения топливом до осуществления частотной доставки в лазерный фокус. По заказу программы HiPER специалисты ФИАН разработали проект Фабрики мишеней, работающей на основе метода FST и обеспечивающей непрерывное производство топливных мишеней и их частотную доставку в фокус экспериментальной камеры HiPER [4]. Одновременно в 2014 г. начаты переговоры между ФИАН и представителями программы CANDY о создании модуля FST-формирования, предназначенного для частотной подачи криогенных мишеней в лазерный фокус мини-реактора, строящегося в Японии.

В Китае действует программа построения и запуска в 2020 г. лазерной установки реакторного масштаба SG-IV с энергией лазера 1,5 МДж [104].

Отметим здесь также государственный проект Республики Южная Корея по созданию инновационного мощного частотного лазера в Корейском прогрессивном физико-техническом институте (KAIST) [122, 123].

Диаметр реакторной камеры составляет не менее 4—6 м, а температура её стенок достигает 1000 К и выше. Эти условия исключают возможность формирования криогенной мишени непосредственно в зоне облучения так, как это делается на экспериментальных лазерных установках.

Мишени с криогенным слоем топлива должны изготавливаться вне камеры реактора на специальной Фабрике мишеней. Для того чтобы обеспечить поступление топлива в реакторную камеру с требуемой частотой, количество изготавливаемых мишеней должно достигать $\sim 1\text{—}10$ штук в секунду, или $\sim 10^5\text{—}10^6$ штук в сутки. Это требует перехода от создания единичных мишеней к их массовому производству, т.е. разработки методов быстрого формирования слоя внутри бесподвесных мишеней.

Мировая программа развития технологии массового производства мишеней для реакторов ИТС включает [124—131]:

- технологию массового производства и сборки отдельных частей мишени. Ближайшая цель: производство 1000 мишеней в день. Достигнуты обнадеживающие результаты для мишеней прямого поджига (fast ignition), а также для пористых оболочек;

- минимизацию ручного труда: роботы-автоматы для сборки оболочка—конус (мишени прямого зажигания), массовое производство оболочек и др. К настоящему времени продемонстрировано производство с помощью роботов 100 сборок за 8 ч [124];

- поиск новых более технологичных материалов: металлические пены, внедрение наночастиц металла в полимерную матрицу, использование различных добавок к материалу оболочек. Найдено, что слой из термопластика с добавками металлических наночастиц имеет более высокую прочность и гладкую поверхность при толщине, равной размеру наночастиц;

- технологию массового производства криогенных мишеней: надо получить топливный слой высокого качества за короткое время внутри массива бесподвесных оболочек;

- инжекцию мишеней: разработки системы определения и коррекции траектории, разработки инжектора криогенных мишеней, работающего при $T \sim 17\text{—}19$ К в режиме $1\text{—}10$ Гц (пневматический, электростатический, электромагнитный, гибридный). К настоящему времени в США продемонстрирована частота инжекции мишеней 6 Гц со скоростью 400 м/с. Эти результаты получены при комнатной температуре (надо при $17\text{—}19$ К) для инжектора пневматического типа. Исследование работы пневматического инжектора при криогенных температурах и анализ проблемы загрязнения камеры посторонним газом позволят принять окончательное решение о применимости пневматического инжектора в реакторах ИТС;

- мини-реактор для отработки реакторных технологий. В Японии в рамках создания мини-реактора (программа CANDY) построен неодимовый лазер НАМА с диодной накачкой, с помощью которого впервые экспериментально продемонстрировано синхронное облучение сферических оболочек с частотой 1 Гц и зафиксирован выход термоядерных нейтронов [9, 10, 132]. Ввод оболочек в камеру осуществлялся при комнатной температуре с помощью гравитационной инжекции. В ходе эксперимента в камеру было инжектировано более 600 оболочек из дейтерированного полистирола диаметром 1 мм. Облучение каждой оболочки лазерным излучением производилось на расстоянии 18 см от места инжекции. Интенсивность лазерного излучения составляла $2 \cdot 10^{18}$ Вт/см², энергия падающего излучения на мишень — 1 Дж при длительности импульса 300 фс и длине волны излучения 800 нм. В процессе облучения зафиксирован выход термоядерных DD-нейтронов $2,5 \cdot 10^4$. На рис. 12, взятом из [9], показан момент двухстороннего облучения инжектированной летящей оболочки светом лазера НАМА.

Перечисленные задачи являются тем более актуальными, что в мировой практике отсутствует опыт работы с бесподвесными мишенями. Вместе с тем создание перспективной технологии реакторных мишеней требует навыков работы с массивом бесподвесных криогенных мишеней в условиях минимизации расхода трития, что достигается при минимизации временных и пространственных характеристик каждого производственного шага, в частности, при минимизации времени формирования мишеней и снижения концентрации трития в топливной смеси. Полученный топливный слой должен не только отвечать жёстким критериям качества, но и сохранять их в процессе доставки, что ставит перед технологией дополнительную задачу — получение долговечного слоя, т.е. слоя с устойчивыми характеристиками качества.

Как мы видели, традиционные технологии формирования криогенного слоя значительной толщины не удовлетворяют ни одному из перечисленных требований.

Рис. 12. Выстрел лазера по летящей оболочке

Поэтому в ведущих лабораториях мира интенсивно ведутся исследования по созданию технологии, обеспечивающей формирование криогенного слоя в незакреплённых оболочках. Разрабатывается несколько подходов к технологии массового производства, основанной на указанном принципе, а именно: в США [130] — метод Fluidized bed (технология формирования в кипящем слое), в США и Японии [130, 131] — метод Wetted foam (технология формирования слоя в пористой матрице), в России [121] — метод FST (аббревиатура от free-standing target, или «незакреплённая мишень»).

Метод Fluidized bed заключается в том, что массив незакреплённых оболочек подвешивается в потоке газообразного гелия. Охлаждение оболочек и образование слоя происходят за счёт постепенного снижения температуры гелия. Предполагается, что топливный слой в момент перехода через тройную точку должен охлаждаться достаточно медленно, чтобы сформировался прозрачный кристаллический слой. Хотя данный метод и позволяет работать с массивом оболочек, однако длительное время формирования приводит к сравнительно большому расходу трития в мишенной системе, что недопустимо.

Другой подход, который изучается в лабораториях США и Японии, — формирование слоя за счёт его распределения внутри пористой стенки топливной капсулы, так называемый метод Foam layering. Применение пористой капсулы позволяет удерживать жидкий или твёрдый топливный слой в равнотолщинной конфигурации при условии, что поры не пересыщены. Однако согласно расчётам [133] для эффективной реализации схемы прямого сжатия необходимо, чтобы пористый слой был именно пересыщен, причём толщина топливного слоя над порами должна достигать 280 мкм. Таким образом, наличие пористой стенки не снимает проблему симметризации слоя.

Отметим, что в настоящее время ни один из этих подходов так и не принёс обнадеживающих результатов в решении проблемы массового производства криогенных мишеней. Поэтому с 2010 г. в США исследуется новый сценарий производства [125], отличительные особенности которого следующие:

- использование эффекта капиллярного электрофореза для управления процессами получения пористой капсулы и формирования внутри неё топливного слоя;

- нанесение внешнего защитного покрытия из твёрдого неона или ксенона на пористую капсулу. Такое покрытие играет роль барьера для жидкого топлива в процессе формирования слоя, а также защищает топливный слой от перегрева при полёте мишени внутри камеры реактора.

К сожалению, данный подход пока не продемонстрирован экспериментально ни для D_2 -, ни для DT-топлива.

Подчеркнём, что к настоящему времени в мире успешно продемонстрирован только метод FST, развитый в ФИАН. Поскольку в основу метода положен принцип работы с движущимися незакреплёнными мишенями, метод FST позволяет непрерывно (или с необходимой частотой) формировать криогенные мишени [121]. При этом время формирования одной мишени не превышает 15 с, что позволяет существенно снизить запасы трития в мишенной системе по сравнению с традиционными методами (традиционные методы работы с единичными мишенями — β -layering и IR-redistribution — требуют от 8 до 24 ч). Высокая скорость охлаждения и использование в составе топлива высокоплавких добавок позволяют формировать методом FST криогенный слой в ультрадисперсном (т.е. в аморфном или нанокристаллическом) состоянии, преимуществами которого являются изотропность, термостойкость, более высокая механическая прочность по сравнению с равновесным состоянием твёрдого топлива, а также малое время формирования. Такие свойства слоя позволяют минимизировать риски его разрушения в процессе доставки мишени в камеру реактора ИТС [134].

Кроме того, применение изотропного ультрадисперсного криогенного слоя позволяет повысить эффективность сжатия топлива по схеме ИТС. В этой связи отметим результаты теоретических исследований Ливерморской группы (США) [135, 136], которые показали, что все элементы мишени, предназначенной для экспериментов на установке NIF, должны представлять собой изотропные нанокристаллические (т.е. ультрадисперсные) среды, поскольку только в этом случае вероятность искажения фронта ударной волны в процессе имплозии мишени минимальна. Приведём соответствующую цитату из работы [136]:

«We present non-equilibrium molecular dynamics simulations of wave propagation in nano-crystals. We find that the width of the travelling wave front increases with grain size, d , as $d^{1/2}$... Our results clearly show

that nano-crystalline NIF targets would guarantee small fluctuations in the shock front, decreasing the probability for unwelcome instabilities».

Таким образом, требования к качеству топливного слоя, т.е. ограничения на несферичность, разнотолщинность и шероховатость поверхности [18], должны быть дополнены требованием к микроструктуре слоя, а именно: для минимизации риска разрушения мишени и повышения эффективности сжатия топлива необходимо, чтобы криогенный топливный слой находился в изотропном ультрадисперсном состоянии.

Именно поэтому важнейшей задачей технологии криогенных мишеней для оптимальной реализации схемы ИТС является поиск условий получения криогенного слоя в изотропном ультрадисперсном состоянии. Метод FST — единственный известный в настоящее время метод, который позволяет экспериментально реализовать условия для формирования топлива именно в таком состоянии.

Таким образом, в настоящее время метод FST является единственным кандидатом, который впервые позволит выполнить основные требования, предъявляемые к работе Фабрики мишеней:

- решить проблему формирования качественного топливного слоя внутри мишени;
- решить проблему сохранения качества топливного слоя при доставке мишеней в зону термоядерного горения;
- реализовать поточное производство дешёвых топливных мишеней с требуемой частотой подачи в реактор ИТС.

Созданная в ФИАН уникальная технология поточного производства криогенных топливных мишеней служит научной и технологической базой для развития принципиально нового направления в отечественной и мировой энергетике — энергетике инерциального термоядерного синтеза.

Теоретическое и экспериментальное обоснование метода FST будет детально представлено в следующих выпусках журнала.

REFERENCES

1. **Basov N.G., Krokhin O.N.** The condition of plasma heating by the optical generator radiation. — ZhETF (JETPh), 1964, vol. 47, p. 171. (in Russian).
2. **Krokhin O.N.** State of Art the program of target fabrication at the Lebedev Physics Institute. — Laser and Particle Beams, 1999, vol. 17, № 3, p. 395.
3. **Tanaka K.A.** Inertial fusion summary. — In: 22nd IAEA Fusion Energy Conf. Geneva, Switzerland, Report S/1—5, 13—18 October, 2008.
4. **Official site of HiPER program:** <http://www.hiper-laser.org/>.
5. **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. SPIE, 2011, vol. 8080, p. 80802M.
6. **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.
7. **Yuferev S.** Super-power laser installation will be used for thermonuclear fusion in Sarov. — Paper «Military review», 15 February 2013 (in Russian).
8. **Bel'kov S.A., Garanin S.G., Shagalkin Yu.V.** Installation UFL-2M, first steps on its creation. Report on the XL International (Zvenigorod) conference of plasma physics and CNF. Zvenigorod, Moscow region, Russia, 11—15 February 2013 (in Russian).
9. **Komeda O., Nishimura Y., Mori Y. et al.** Target injection and engagement for neutron generation at 1 Hz. — Plasma and Fusion Research: Rapid Communications, 2013, vol. 8, p. 1205020.
10. **Sekine T., Kurita T., Satoh N. et al.** Conceptual design on kilo-Joule laser driver for inertial fusion mini-reactor CANDY. — In: 25th IAEA Fusion Energy Conf., RF Report IFE/P6-12. St. Petersburg, 13—18 October, 2014.
11. **Hurricane O.A., Callahan D.A., Casey D.T. et al.** Fuel gain exceeding unity in an inertially confined fusion implosion. — Letters to Nature, 2014, p.1; doi: 10.1038/nature13008.
12. **Aleksandrova I.V., Ivanenko O.M., Kalabukhov V.A. et al.** HTSC maglev systems for IFE target transport applications. — J. Russian Laser Research, 2014, vol. 35, p. 151; doi: 10.1007/s10946-014-9410-y.
13. **Koresheva E.R., Aleksandrova I.V., Koshelev E.L. et al.** Conception of a cryogenic target factory for IFE reactor. — In: 25th IAEA Fusion Energy Conf. St. Petersburg, RF, 13—18 October, 2014.

14. **Basov N.G., Gus'kov S.Yu., Danilkin G.V. et al.** Thermonuclear output of targets for short-wave range lasers. — *Kvantovaya elektronika* (Quantum electronics), 1985, issue 12, p. 1289 (in Russian).
15. **Lindl J.D.** Development of the indirect-drive approach to inertial confinement fusion and the target physics basis for ignition and gain. — *Physics of Plasmas*, 1995, vol. 2, p. 3933.
16. **Gus'kov S.Yu., Zmitrenko N.V., Rozanov V.B.** Effect of the initial phase state of DT-matter on the compression of inertial fusion targets. — *J. Russian Laser Research*, 2011, vol. 32, p. 596.
17. **Afanas'ev Yu.V., Basov N.G., Gamaliy E.G. et al.** Theory of heating and compression of lowentropic thermonuclear targets. — In coll. *Proceedings of PhIAS*. — M.: Nauka (Science), 1982, vol. 134, p. 184 (in Russian).
18. **Schultz K.R., Goodin D., Nobile A.** IFE target fabrication and injection achieving «Believability». — *Nuclear Instruments and Methods*, 2001, vol. A 464, p. 109.
19. **Basko M.M., Gus'kov S.Yu., Nedoseev S.L., Churazov M.D.** Targets of inertial thermonuclear fusion. — In coll.: *Nuclear fusion with inertial confinement. Modern state and prospects for energetics*. — M.: Fizmatlit (PhysMathLit), 2005, chapter 3, p. 34 (in Russian).
20. **Laser** thermonuclear targets and ultrastrong microballoons. *Proceedings of PhIAS*. Vol. 220. — M.: Nauka (Science), 1992. 198 p. (in Russian).
21. **Aleksandrova I.V., Koresheva E.R., Osipov I.E. et al.** Free-standing target technologies for ICF. — *Fusion Technology*, 2000, vol. 38, № 1, p. 166.
22. **Malkov M.P., Danilov I.B., Zel'dovich A.G., Fradkov A.B.** Handbook on cryogenics physical-technical foundations. — M.: Energiya (Energy), 1973. 392 p. (in Russian).
23. **McCrory R.L., Verdon C.P.** Computer modeling and simulation in inertial confinement fusion. — *Inertial Confinement Fusion*, 1989, p. 83.
24. **Town R.P.J., Delettrez J.A., Epshtein R. et al.** OMEGA cryogenic target designs. — *Laboratory for Laser Energetics: LLE Review*, 2000, Quarterly Report, vol. 82, p. 49.
25. **Bodner S.E. et al.** New high-gain target design for a laser fusion power plant. *Proceed.* — In: 1st IAEA TCM on Physics and Technology of IFE: Targets and Chambers. Madrid, Spain, June 7—9, 2000.
26. **McCrory R.L., Bahr R.E., Boehly T.R. et al.** OMEGA experiments and preparation for moderate-gain direct-drive experiments on NIF. — In: *Inertial Fusion Science and Applications 1999*. Elsevier, 2001, p. 43.
27. **Harding D.R., Meyerhofer D.D., Sangster T.C. et al.** Cryogenic target-implosion experiments on OMEGA. — *J. of Physics: Conference Series*, 2008, vol. 112, p. 022001.
28. **Atzeni S., Schiavi A., Bellei C.** Targets for direct-drive fast ignition at total energy of 200—400 kJ. — *Physics of Plasmas*, 2007, vol. 14, p. 052702.
29. **Tolley M.K., Perrin J.-P., Perlado J.M.** Microtarget requirements, production and delivery for HiPER. — In: 22nd IAEA Fusion Energy Conf. Geneva, Switzerland, 12—18 October, 2008, Report IF/P7—2.
30. **Gus'kov S.Yu.** Fast ignition of inertial fusion targets. — *Fizika plazmy* (Plasma Physics), 2013, vol. 39, № 1, p. 3 (in Russian).
31. **Tabak M., Hammer J., Glinsky M.E. et al.** Ignition and high gain with ultra powerful lasers. — *Physics of Plasmas*, 1994, vol. 1(5), p. 1626.
32. **Harrison E.R.** Alternative approach to the problem of producing controlled thermonuclear power. — *Physical Review Letters*, 1963, vol. 11, p. 535.
33. **Pukhov A., Meier-ter-Vehn J.** Laser hole boring into overdense plasma and relativistic electron currents for fast ignition of ICF capsules. — *Physical Review Letters*, 1997, vol. 79, p. 2686.
34. **Atzeni S., Meier-ter-Vehn J.** The physics of inertial fusion/beam plasma interaction, hydrodynamics, hot dense matter. — Oxford: Clarendon Press, 2004. 458 p.
35. **Gus'kov S.Yu.** Direct ignition of inertial fusion targets by laser plasma ions flux. — *Kvantovaya elektronika* (Quantum electronics), 2001, vol. 31, № 10, p. 885 (in Russian).
36. **Norimatsu T.** Target fabrication and injection activities toward a laser fusion reactor with wet wall. — In: 2nd US/Japan Workshop on IFE Target Fabrication and Injection. San Diego, USA, February 3—4, 2003.
37. **Norreys P.A., Allott R., Beg F.N. et al.** Relativistic laser-plasmas and guided conical compression experiments relevant to the fast ignitor scheme for ICF. — In: *Inertial Fusion Science and Applications 1999*. Elsevier, 2001, p. 427.
38. **Theobald W., Solodov A.A., Stoeckl C. et al.** Initial cone-in-shell fast-ignition experiments on OMEGA. — *Physics of Plasmas*, 2011, vol. 18(5), p. 056305.
39. **Roth M., Cowan T.E., Key M.H. et al.** Fast ignition by laser-accelerated proton beams. — *Physical Review Letters*, 2001, vol. 86, p. 436.
40. **Atzeni S., Temporal M., Honrubia J.J.** A First analysis of fast ignition of precompressed ICF fuel by laser-accelerated protons. — *Nuclear Fusion*, 2002, vol. 42, p. L1.
41. **Feoktistov L.P.** LTF horizons. — In book: *Future of science*. — M.: Znanie (Knowledge), 1985, p. 18 (in Russian).

42. **Murakami M., Nagatomo H., Nishihara K. et al.** A new ignition scheme-impact ignition. — In: XXVIII European Conf. on Laser Interaction with Matter. Roma, Italy, September 6—8, 2004.
43. **Kodama R., Norreys P.A., Mima K. et al.** Fast heating of ultrahigh-density plasma as a step towards laser fusion ignition. — *Nature*, 2001, vol. 412, p. 798.
44. **Tanaka K.A., Kodama R., Kitagawa Y. et al.** Review of fast ignition related research at ILE Osaka University. — In: *Inertial Fusion Science and Applications 2001*. Elsevier, 2002, p. 362.
45. **Fusion Science Center for Extreme States of Matter.** Annual Report, April 2012—April 2013; <http://fsc.ile.rochester.edu/pub/FSC-Annual-Report-2012.pdf>.
46. **Sinenian N., Theobald W., Frenje J.A. et al.** Proton emission from cone-in-shell fast-ignition experiments on OMEGA. — *Physics of Plasmas*, 2012, vol. 19, p. 112708.
47. **Solodov A.A., Anderson K.S., Betti R. et al.** Integrated simulations of implosion, electron transport, and heating for direct-drive fast ignition targets. — *Physics of Plasmas*, 2009, vol. 16(5), p. 056309.
48. **Haan S.W., Dittrich T., Strobel G. et al.** Update on NIF indirect drive ignition target design. — In: *Inertial Fusion Science and Applications 2001*. Elsevier, 2002, p. 207.
49. **Bernat T.P.** Target technologies for indirect-drive ignition on NIF. — In: *Inertial Fusion Science and Applications 1999*. Elsevier, 2001, p. 883.
50. **Veselov A.V., Drozhin V.S., Druzhinin A.A. et al.** ICF target technology at the Russian Federal Nuclear Center. — *Fusion Technology*, 1995, vol. 28, p. 1838.
51. **Vatulin V., Afanas'eva V., Bazin A. et al.** Indirect fusion targets for heavy ion driver scenario. — In: *Inertial Fusion Science and Applications 1999*. Elsevier, 2001, p. 503.
52. **Ramis R., Honrubia J., Ramirez J., Meier-ter-Vehn J.** Hohlraum targets for HIDIF. — In: *Inertial Fusion Science and Applications 1999*. Ed. by C. Labaune, W.J. Hogan, K.A. Tanaka. Elsevier, 2001, p. 509.
53. **Hoffmann I.** HIDIF— an approach to high repetition rate inertial fusion with heavy ions. — *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research*, 1998, vol. A 415, p. 11.
54. **Moody J.D., London R.A.** Experimental and theoretical characterization of the actively controlled thermal environment in a cryogenic hohlraum. — *Fusion Science and Technology*, 2004, vol. 45 (1), p. 27.
55. **Henderson T.M., Johnson R.R.** The implosion of cryogenic spherical shell targets. — *Applied Physics Letters*, 1977, vol. 31, № 1, p. 18.
56. **Musinski D.L. et al.** Cryogenic inertial confinement fusion target technology at the OMEGA facility, University Rochester. — *J. Vacuum Science and Technology*, 1987, vol. A5 (4), p. 2746.
57. **Marshall F.J., Letzring S.A., Verdon C.P. et al.** Cryogenic-laser-fusion target implosion studies performed with the OMEGA uv-laser system. — *Physical Review*, 1989, vol. A 40, № 5, p. 2547.
58. **Marshall F.J., Letzring S.A., Verdon C.P. et al.** Uniform liquid-fuel layer produced in a cryo-genic target by a time-dependent thermal gradient. — In: *ILE Annual Report, University of Rochester*, 1988, p. 203.
59. **Norimatsu T., Katayama H., Mano T. et al.** Fabrication of a cryogenic foam target for inertial confinement fusion experiments. — *J. Vacuum Science and Technology*, 1988, vol. A 6(6), p. 3144.
60. **Energy from Inertial Fusion.** Ed. by W.J. Hogan. — Vienna: International Atomic Energy Agency, 1995. 457 p.
61. **Nuclear fusion with inertial confinement.** Modern state and prospects for energetic. Coll. of articles edited by Sharkov B.Yu. — M.: Fizmatlit (PhysMathLit), 2005. 262 p. (in Russian).
62. **Proceed.** 1st Conference on Inertial Fusion Energy. Yokohama, Japan, April 25—27, 2012. — *Plasma and Fusion Research*, 2013, vol. 8(2), p. 3404041; http://www.jspf.or.jp/PFR/PFR_articles/.
63. **Aleksandrova I.V., Belolipetskiy A.A., Koresheva E.R.** Problem state of the cryogenic fuel targets in present-day program of inertial thermonuclear fusion. — *Vestnik RAEN (Herald of the RANS)*, 2007, vol. 7, № 2, p. 37 (in Russian).
64. **Pathways to Energy from Inertial Fusion: an Integrated Approach.** Final Report, Coordinated Research Project 2006—2010. IAEA-TECDOC-1704. — Vienna: IAEA, 2013.
65. **Kreutz R.D.** Pellet delivery for the conceptual inertial confinement fusion reactor HIBALL. — *Fusion Technology*, 1988, vol. 8, p. 2708.
66. **Yukio S., Yoshishiro M.** Studies of a magnetic pellet injector for laser fusion. — *Review of Laser Engineering*, 1982, vol. 10, № 3, p. 318.
67. **Yoshi A., Kogoshi S.** Fuel injection. — *J. Fusion Energy*, 1983, vol. 3, № 5/6, p. 385.
68. **Yoshida H., Yamahira Y.** Optimization and evaluation of coil gun as a target injector for laser fusion. — *Laser Original*, 2003, p. 343.
69. **Petzoldt R.W., Goodin D., Siegel N.** Status of target injection and tracking studies for inertial fusion energy. — *Fusion Technology*, 2000, vol. 38, № 1, p. 22.
70. **Endo T., Inayama S., Wakamatsu K.** Preliminary conceptual design of target injector for fast-ignition laser fusion. — In: *2nd US/Japan Workshop on Target Fabrication, Injection and Tracking*. San Diego, USA, February 3—4, 2003.

71. **Petzoldt R.W.** IFE target injection and tracking experiments. — *Fusion Technology*, 1998, vol. 34, pp. 831—839.
72. **Merkul'ev Yu.A., Koresheva E.R.** P. 4. The input node of the targets into the chamber. — In coll.: *Laser thermonuclear installation DEL'FIN: active complex and development directions. Report on research work. Inv. № 0283.0056237*, Moscow, 1983, p. 221 (in Russian).
73. **Koresheva E.R., Merkul'ev Yu.A., Nikitenko A.I., Osipov I.E., Tolokonnikov S.M.** Destruction peculiarities of cryogenic targets and their insertion into the focus of a powerful laser. — *VANT. Ser. Termoyadernyi sintez (Problems of Atomic Science and Technology. Ser. Thermonuclear Fusion)*, 1988, issue 1, p. 57 (in Russian).
74. **Koresheva E.R., Merkul'ev Yu.A., Nikitenko A.I., Osipov I.E., Tolokonnikov S.M.** The peculiarities of laser cryogenic targets destruction and their injection into a powerful laser focus. — *Laser and Particle Beams*, 1988, vol. 6 (2), p. 245.
75. **Baranov G.D., Koresheva E.R., Listratov V.I. et al.** Delivery of cryogenic targets in laser focus. — *Kvantovaya elektronika (Quantum electronics)*, 1989, № 8, p. 114 (in Russian).
76. **Aleksandrova I.V., Koresheva E.R., Krokhin O.N., Osipov I.E.** Rapid low temperature technique for cryogenic solid layering. — *J. Moscow Physics Society*, 1997, vol. 2, p. 145.
77. **Koresheva E.R., Merkul'ev Yu.A., Nikitenko A.I., Osipov I.E., Tolokonnikov S.M.** Autonomous complex devices of cryogenic targets preparation and injection into a powerful laser focus. — *Proceedings of PhIAS, vol. 220 «Laser thermonuclear targets and ultrastrong shells»*. — M.: Nauka (Science), 1992, p. 61 (in Russian).
78. **Koresheva E.R., Osipov I.E., Aleksandrova I.V.** ICF cryotarget: delivery. — *J. Moscow Physics Society*, 1994, vol. 4, № 3, p. 183.
79. **Tolokonnikov S.M., Bushuev V.S., Nikitenko A.I.** The particle injector for the «Ballistic Furnace». — *Fusion Technology*, 1995, vol. 28, № 5, p. 1787.
80. **Osipov I.E., Koresheva E.R., Baranov G.D. et al.** A device for cryotarget rep-rate delivery in IFE target chamber. — In: *Inertial Fusion Science and Application, State of the art 2001*. Elsevier, 2002, p. 810.
81. **Koresheva E.R., Aleksandrova I.V., Osipov I.E. et al.** Progress in the extension of free-standing target technologies on IFE requirements. — *Fusion Science and Technology*, 2003, vol. 35, № 3, p. 290.
82. **Koresheva E.R., Osipov I.E., Tolokonnikov S.M. et al.** Protective sabot for cryogenic target delivery to the laser focus. — *VANT. Ser. Termoyadernyi sintez (Problems of Atomic Science and Technology. Ser. Thermonuclear Fusion)*, 2004, issue 2, pp. 11-24. (in Russian).
83. **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.
84. **Aleksandrova I.V., Koresheva E.R., Koshelev E.L. et al.** A key to the problem of cryogenic target survival during its delivery to the burn area. — *VANT. Ser. Termoyadernyi sintez (Problems of Atomic Science and Technology. Ser. Thermonuclear Fusion)*, 2007, issue 3, p. 27. (in Russian).
85. **Aleksandrova I.V., Gromov A.I., Ivanenko O.M. et al.** Elements base development for transport and positioning of free-standing cryogenic targets in research on ITF. Report on the XL International (Zvenigorod) conference of plasma physics and CNF. Zvenigorod, Moscow region, Russia, 11—15 February 2013 (in Russian).
86. **Aleksandrova I.V., Belolipetskiy A.A., Kalabukhov V.A. et al.** High rep-rate free-standing target supply system for HiPER. — In: *SPIE Laser Energy Workshop. Prague, Czech Rep., Apr. 15—18, 2013*.
87. **Baranov G.D., Koresheva E.R., Listratov V.I. et al.** Device for thermonuclear fuel elements injection into fusion reactor. A.c. № 1586437, tender № 4379549 of 11 January 1988, registered in the USSR State register of inventions on 15 April 1990 (in Russian).
88. **Koresheva E.R., Osipov I.E.** Laser thermonuclear installation. A.c. № 1586437, tender № 4843163 of 27 June 1990, registered in the USSR State register of inventions on 1 April 1992 (in Russian).
89. **Koresheva E.R., Osipov I.E.** Device for forming and injection of cryogenic fuel targets of laser thermonuclear installation. A.c. № 1820757, tender № 4925861 of 5 April 1991, registered in the USSR State register of inventions on 12 October (in Russian).
90. **Tsuji R.** Trajectory adjusting system using a magnetic lens for a Pb-coated superconducting IFE target. — *Fusion Engineering and Design*, 2006, vol. 81, p. 2877.
91. **Kassai T., Tsuji R.** Analysis of trajectory adjusting system using a magnetic lens for the superconducting IFE target. — *J. Physics: Conference Series*, 2008, vol. 112, p. 032047.
92. **Shmatov M.L., Petzoldt R.W., Valmianski E.I.** Measures to provide survival of the direct drive and fast ignition targets in the reaction chamber. — *Fusion Science and Technology*, 2003, vol. 35, p. 312.
93. **Kuteev B.V.** Interaction of cover and target with xenon gas in the IFE-reaction chamber. Research Report NIFS-718, National Institute for Fusion Science, Japan, Nov. 2001.
94. **Moses E.I., Wuest C.R.** The National Ignition Facility: status and plans for laser fusion and high-energy-density experiments. — *Fusion Science and Technology*, 2003, vol. 43, № 3, p. 420.

95. **Hinkel D.E., Edwards M.J., Amendt P.A. et al.** Progress toward ignition at the National Ignition Facility. — *Plasma Physics and Controlled Fusion*, 2013, vol. 55, № 12, p. 124015.
96. **Haan S.W., Atherton J., Clark D.S. et al.** NIF Ignition Campaign target performance and requirements: status May 2012. — *Fusion Science and Technology*, 2013, vol. 63, № 2, p. 67.
97. **Andre M.L.** Laser Megajoule Project Status. — In: *Inertial Fusion Science and Applications 1999*. Elsevier, 2000, p. 32.
98. **Ebrardt J.** The Laser Megajoule Project: progressing towards fusion. — In: *ISTC Workshop*. Moscow, 2008; [http://www.istc.ru/istc/istc.nsf/va_webresources/events_1/\\$file/ebrardt.pdf](http://www.istc.ru/istc/istc.nsf/va_webresources/events_1/$file/ebrardt.pdf).
99. **Sangster T.C., Delettrez J.A., Epstein R. et al.** Direct-drive cryogenic target implosion performance on OMEGA. — *LLE Review*, Quarterly Report, 2002, vol. 93, p. 1.
100. **Annenkov I.V., Bagretsov V.A., Bezuglov V.G. et al.** 120 TW pulsed laser «Iskra-5». — *Kvantovaya elektronika* (Quantum electronics), 1991, vol. 18, № 5, p. 536.
101. **Garanin S.G., Zaretskiy A.I., Il'kaev R.I. et al.** Channel of powerful installation «Luch» for LTF with 3.3 kJ pulse energy and duration of 4 ns. — *Kvantovaya elektronika* (Quantum electronics), 2005, vol. 35, № 4, p. 299 (in Russian).
102. **Lehecka T., Bodner S., Deniz A.V. et al.** The NIKE KrF laser fusion facility. — *J. Fusion Energy*, 1991, vol. 10, № 4, p. 301.
103. **Shiraga H., Fujioka S., Nakai M. et al.** Integrated experiments of fast ignition targets by Gekko-XII and LFEX lasers. — *High Energy Density Physics*, 2012, vol. 8 (3), p. 227.
104. **Zhang W.Y., He X.T.** Status of inertial fusion energy in China. — In: *21st IAEA Fusion Energy Conf.* Chengdu, China, October 16—21, 2006, Report OV6-1; http://www-pub.iaea.org/mtcd/meetings/fec2006presentations/presentations/19-oct-06/talk_ov6-1.pdf.
105. **Kucheev S.O., Hamza A.V.** Condensed hydrogen for thermonuclear fusion. — *J. Applied Physics*, 2010, vol. 108, p. 091101.
106. **Koresheva E.R.** The structure of cryolayer in fusion targets. — *Short messages on PhIAS physics*, 1984, № 12, p. 35 (in Russian).
107. **Kozioziemski B.J., Chernov A.A., Mapoles E.R., Sater J.D.** Metastable polymorphs of hydrogen isotopes solidified near the triple point. — *Physical Review*, 2010, vol. B 82, p. 012104.
108. **Bittner D.N., Collins G.W., Monsler E., Letts S.** Forming uniform HD layers in shells using infrared radiation. — *Fusion Technology*, 1999, vol. 35, p. 244.
109. **Bittner D.N., Collins G.W., Sater J.D.** Generating low-temperature layers with IR heating. — *Fusion Science and Technology*, 2003, vol. 44, p. 749.
110. **Sater J.D., Kozioziemski B.J., Collins G.W. et al.** Cryogenic D—T fuel layers formed in 1mm spheres by beta-layering. — *Fusion Technology*, 1998, vol. 35, p. 229.
111. **Kozioziemski B.J., Sater J.D., Moody J.D. et al.** X-ray imaging of cryogenic deuterium-tritium layers in a beryllium shell. — *J. Applied Physics*, 2005, vol. 98, p. 1031051.
112. **Kozioziemski B.J., Collins G.W., Sater J.D. et al.** ³He evolution in deuterium-tritium layers. — In: *13th Target Fabrication Meeting*. Catalina Island, USA, November 8—12, 1999.
113. **Wanner R., Meyer H.** Sound velocity in solid hydrogen and deuterium. — *Physics Letters*, 1972, vol. A 41, № 3, p. 189.
114. **Nakai S.** Investigation toward inertial fusion energy at ILE Osaka. — In: *1st IAEA-TM on Physics and Technology of Inertial Confinement Fusion Energy Targets and Chambers*. Madrid, Spain, 7—9 June 2000.
115. **Meier W.R.** An integrated research plan for IFE technology. — *Ibid.*
116. **Steinmetz K.** Coordination of IFE keep-in-touch research activities in Europe. — *Ibid.*
117. **Obenchain S.** Overview of the NRL laser fusion program. — In: *Presentation to National Research Council's Review on «Prospects for Inertial Confinement Fusion Energy Systems»*. November 2011; http://fire.pppl.gov/IFE_NAS5_NRL2_Obenschain.pdf.
118. **Laser Inertial Fusion Energy Power Plant.** LIFE home page: <https://life.llnl.gov/>.
119. **Dunne M.** Overview of the LIFE Power Plant. — *Presentation to National Research Council's Review on «Prospects for Inertial Confinement Fusion Energy Systems»*. January 2011; http://fire.pppl.gov/IFE_NAS2_LLNL_Dunne_LIFE_Over.pdf.
120. **Azechi H.** Present status of the FIREX programme for the demonstration of ignition and burn. — *Plasma Physics and Controlled Fusion*, 2006, vol. 48, № 12B, p. B267.
121. **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.
122. **Kong H.J., Cha S., Kalal M.** 4-beam coherent combination laser using self-phase-controlled SBS-PCM for LIFE driver. — In: *1st Conf. on Inertial Fusion Energy*. Yokohama, Japan, April 25—27, 2012.

123. **Kong H.J., Shin J.S., Beak D.H., Park S.** Current trends in laser fusion driver and beam combination laser systems using stimulated brillouin scattering phase conjugate mirrors for a fusion driver. — J. Korean Physics Society, 2010, vol. 56, № 1, p. 177.
124. **Alexander N.B.** Development of rep-rated target production — a step towards IFE target production. — In: 3rd IAEA RCM on «Pathways to Energy from Inertial Fusion: an Integrated Approach». Vienna, Austria, March 22—24, 2010.
125. **Harding D.R.** Mass production of targets for inertial fusion. — Ibid.
126. **Alexander N.B.** Pathways to energy from inertial fusion — an integrated approach in the USA. — Ibid.
127. **Nagai K.** Encapsulation of low density plastic foam materials for the fast ignition targets and their mass production using microfluid devices. — Ibid.
128. **Latkowski J.F.** Dynamic chamber systems for laser inertial fusion based energy (LIFE). — Ibid.
129. **Proceedings** of 3rd European Target Fabrication Workshop. Oxford, UK, September 29 — October 1, 2010.
130. **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, October 11—13, 2004.
131. **Norimatsu T., Nagai K., Takeda T., Mima K., Yamanaka T.** Update for the drag force on an injection pellet and target fabrication for inertial fusion. — Fusion Science and Technology, 2003, vol. 43, № 3, p. 339.
132. **Mori Y., Sekine T., Komeda O. et al.** 1 Hz fast-heating fusion driver HAMA pumped by a 10 J green diode-pumped solid-state laser. — Nuclear Fusion, 2013, vol. 53, p. 073011.
133. **Skupski S., Betti R., Collins T.J.B. et al.** High-gain direct-drive target designs for the National Ignition Facility. — Inertial Fusion Science and Applications 2001. Elsevier, 2002, p. 240.
134. **Aleksandrova I., Belolipetskiy A., Koresheva E. 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.
135. **Cook R.C.** A model study of the possible effect of beryllium grain sound speed anisotropy on ICF capsule implosions. — Fusion Sci. Technol., 2002, vol. 41, p. 155.
136. **Bringa E.M., Caro A., Victoria M. et al.** Atomistic modeling of wave propagation in nanocrystals. — J. Minerals, Metals and Materials Soc., 2005, vol. 57, № 9, p. 67.

AUTHORS

Alexandrova I.V. P.N. Lebedev Physical Institute of the Russian Academy of Sciences, Leninskij Prospekt 53, 119991 Moscow, Russia; ivaaleks@gmail.com.

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; koresh@sci.lebedev.ru.

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

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

Received 5 December 2014
Problems of Atomic Science and Technology
Ser. Thermonuclear Fusion, 2015, vol. 38, issue 1, pp. 57—79.