УДК 621.039.633

ПОТОЧНОЕ ПРОИЗВОДСТВО КРИОГЕННЫХ ТОПЛИВНЫХ МИШЕНЕЙ ДЛЯ ЛАЗЕРНЫХ СИСТЕМ ИТС

*И.В. Александрова, Е.Р. Корешева, Е.Л. Кошелев, Т.П. Тимашева**Физический институт им. П.Н. Лебедева Российской академии наук, Москва, Россия*

Работа с движущимися криогенными топливными мишенями (КТМ) открывает возможность для практической реализации поточных технологий в системах инерционного термоядерного синтеза (ИТС) для производства экологически чистого топлива и выработки электрической и тепловой энергии. В настоящей статье представлены результаты нового цикла исследований, полученные в области построения частотного модуля формирования (МФ) для КТМ с высоким энергетическим выходом. Цель работы — массовое производство КТМ, что представляет особый научный интерес для ИТС-сообщества. Принцип построения МФ основан на методе FST (free-standing target) — формирование твёрдого топливного слоя внутри движущихся бесподвесных оболочек, предложенном и развитом в Физическом институте им. П.Н. Лебедева (ФИАН). Данная технология легла в основу проекта построения в ФИАН специализированного модуля для дешёвого поточного производства КТМ и их частотной бесконтактной доставки в фокус мощных лазерных установок, работающих в импульсно-периодическом режиме.

Ключевые слова: инерционный термоядерный синтез, бесподвесные мишени, FST-метод, поточное производство мишеней.

MASS MANUFACTURING OF CRYOGENIC FUEL TARGETS FOR LASER IFE SYSTEMS

*I.V. Aleksandrova, E.R. Koresheva, E.L. Koshelev, T.P. Timasheva**P.N. Lebedev Physical Institute of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia*

Working with moving cryogenic targets opens up the possibility for the practical implementation of in-line technologies in the inertial fusion energy (IFE) systems for the production of environmentally safe fuels and the generation of electric and thermal energy. This paper presents the results of the advanced research cycle obtained in the field of constructing a repeatable layering module (LM) for cryogenic targets production of a reactor-scaled design. The work is intended for mass manufacturing of IFE targets that is of specific science interest for the high-power laser community. The principle of LM operation is based on the FST (free-standing target) layering method: formation of a solid fuel layer inside free-standing and line-moving targets, which was proposed and developed at the Lebedev Physical Institute (LPI). The practical realization of this innovative technology will be the development of a prototype of a specialized-in-line FST-LM of repeatable operation for the low-cost target production and their noncontact delivery at the focus of the reaction chamber of high repetition rate facilities.

Key words: inertial fusion energy, free-standing targets, FST-layering, in-line target production.

DOI: 10.21517/0202-3822-2020-43-2-67-79

ВВЕДЕНИЕ

В области развития термоядерной энергетики в ряде стран стартовали проекты [1], ориентированные на разработку научной, инженерной и технологической базы для построения пилотного модуля для непрерывного формирования криогенных топливных мишеней (КТМ) в системах ИТС. Это обусловлено тем, что мощные лазерные установки планируется использовать в экспериментах по сжатию КТМ с частотой повторения импульсов 1—10 Гц [2, 3] или даже более 10 Гц [3]. Поэтому фабрика КТМ, работающая в импульсно-периодическом режиме, является неотъемлемой частью проведения современных экспериментов по ИТС. Её задача заключается в массовом и дешёвом производстве топлива, необходимого для пополнения зоны термоядерного горения синхронно с приходом импульса лазерного излучения.

В настоящей статье представлены результаты теоретических и экспериментальных исследований, полученные в области построения модуля формирования (МФ) для массового производства КТМ реакторного класса. Принцип построения МФ основан на методе FST (free-standing target) — формирование твёрдого топливного слоя внутри движущихся бесподвесных оболочек (везде далее FST-МФ), предложенном и развитом в ФИАН [4, 5]. Практическим воплощением данной инновационной технологии станет начатая в ФИАН разработка прототипа специализированного FST-МФ для поточного производства КТМ и их частотной бесконтактной доставки в фокус мощных лазерных установок в системах ИТС.

ОСОБЕННОСТИ ТЕХНИЧЕСКОГО ПОДХОДА

Особенности технического подхода, принятого при проектировании прототипа FST-МФ, определяются необходимостью реализации замкнутого цикла при производстве КТМ:

- первый этап — заполнение полимерных оболочек газообразным топливом;
- второй этап — формирование в движущихся оболочках криогенного топливного слоя (рис. 1);

Рис. 1. Модуль формирования (МФ) для поточного производства криогенных топливных мишеней по методу FST (FST-МФ): а — функциональная схема FST-МФ; б — основные элементы FST-МФ

— третий этап — бесконтактная доставка готовых КТМ в камеру взаимодействия с мощным лазерным излучением.

В рамках этой схемы принята работа с массивом незакреплённых движущихся КТМ, что является принципиальным условием, позволяющим осуществить непрерывное формирование и свободный транспорт КТМ в системах ИТС. Именно такой подход позволяет:

- обеспечить массовое производство КТМ с заданной частотой;
- минимизировать временные и пространственные масштабы каждой операции при подготовке КТМ к облучению, т.е. выполнить основные требования при проведении экспериментов по сжатию КТМ мощным лазером и обеспечить перспективы работы с положительным выходом термоядерной энергии.

Первый этап в производстве КТМ — это диффузионное заполнение полимерных оболочек газообразным топливом, представляющим собой дейтерий (D_2) или дейтерий-тритиевую смесь ($D-T$). Моделирование процесса заполнения оболочек реакторного класса ($\varnothing \sim 4$ мм) до давления ~ 1100 атм. при 300 К в режиме с постоянным градиентом давления для различных материалов и конструкции оболочки представлено в работе [6], в которой рассматриваются простые и двухслойные оболочки из компактного и пористого полимера. Обсуждаются вопросы построения оптимальной схемы $D-T$ -заполнения, позволяющей избежать разрушения оболочки вследствие β -распада трития. В работах [7, 8] дано описание основных элементов установки заполнения, а также представлены результаты её работы для массива полимерных или стеклянных оболочек при их заполнении изотопами водорода до давления 1000 атм. при комнатной температуре. Особенности построения установки обеспечивают требуемые режимы работы, при которых время заполнения оболочек минимально, возможность их разрушения внешним и внутренним давлением исключена, а обратная утечка газа в процессе хранения или транспортировки оболочек между отдельными модулями установки отсутствует.

Третий этап — это создание системы бесконтактного позиционирования и транспорта КТМ, который 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. Исследования, проводимые в ФИАН, включают два основных направления по созданию гибридных систем бесконтактной доставки КТМ, основанных на эффекте квантовой левитации высокотемпературных сверхпроводников (ВТСП) в направляющей PMG (permanent magnet guideway) системе: гравитационный инжектор + PMG и электромагнитный (ЭМ) инжектор + PMG [9, 10]. В настоящее время в ФИАН завершено создание концепции гибридного ускорителя «ЭМ + PMG» и проведены контрольные эксперименты по разработке системы коррекции траектории сверхпроводящего носителя КТМ с электромагнитным запускающим импульсом. Концепция отличается от известных систем ускорения применением следующих элементов [10, 11]:

- сверхпроводящий сабот (носитель КТМ), который содержит в себе не только ускоряемый ВТСП-виток с током, но и ВТСП-пластины, обеспечивающие стабильную левитацию сабота;
- левитационная (бесконтактная) 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.

В настоящей работе нас будет интересовать второй этап замкнутого цикла при производстве КТМ, а именно разработка прототипа специализированного FST-МФ поточного типа для массового производства КТМ для лазерных термоядерных установок различного класса, т.е. работающих с различной частотой подачи лазерного импульса.

МОДУЛЬ FST-ФОРМИРОВАНИЯ ДЛЯ ПОТОЧНОГО ПРОИЗВОДСТВА

КТМ реакторного класса. В ФИАН создана уникальная система формирования КТМ, которая работает с движущимися бесподвесными оболочками, что позволяет осуществить реализацию замкнутого производственного цикла для массива КТМ. Работа системы продемонстрирована для полимерных оболочек диаметром $\varnothing = 0,8\text{—}1,8$ мм и криогенных слоёв толщиной до 100 мкм. Время формирования слоя τ_{form} менее 15 с, частота повторения при криогенной температуре $\nu = 0,1$ Гц [4, 5].

На основе FST-технологий спроектирован частотный FST-МФ для КТМ класса HiPER (High Power laser Energy Research, энергия лазера $E_L = 200$ кДж, $\nu > 1$ Гц) [8]. Базовая КТМ класса HiPER (Baseline Target-2, или BT-2) рассматривается в двух модификациях:

- BT-2 — сферическая полимерная (CH) оболочка ($\varnothing \sim 2$ мм, толщина стенки оболочки $\Delta R = 3$ мкм) с замороженным на её внутренней поверхности топливным слоем ($W = 211$ мкм);
- BT-2a — аналогичная тонкая оболочка ($\varnothing \sim 2$ мм, $\Delta R = 3$ мкм) с прилегающим слоем «полимерная пена + D—T» ($W_p = 70$ мкм), за которым идёт твёрдый слой из чистого D—T-топлива ($W = 120$ мкм). Время формирования для каждой КТМ класса HiPER дано в табл. 1 [4, 8].

Т а б л и ц а 1. Время FST-формирования КТМ различного дизайна

$E_L = 200$ кДж ($\nu \geq 1$ Гц)				$E_L = 1,3$ МДж	
BT-2, мкм	τ_{form}	BT-2a, мкм	τ_{form}	CHGT, мкм	τ_{form}
2R (2094)	$T_{\text{in}} = 37$ К; 13,8 с	2R (2046)	$T_{\text{in}} = 37$ К; 9,8 с	2R (3904)	$T_{\text{in}} = 37$ К; ~30 с
ΔR (3)		ΔR (3)		ΔR (1)	
W (211)		W (120)		W (190)	
W_p (—)		W_p (70)		W_p (261)	

Примечание. T_{in} — температура входа КТМ в КФ.

В данной статье нас будут интересовать КТМ реакторного класса, т.е. КТМ с высоким энергетическим выходом. КТМ класса HiPER рассматриваются здесь в сравнительных целях, что важно при обсуждении изменений, которые необходимо учесть при проектировании модуля FST-формирования для КТМ реакторного класса. Один из вариантов классической реакторной КТМ с высоким коэффициентом

усиления по энергии k обсуждается в работе [12] (в зарубежной литературе Classical High Gain Target, or CHGT). Это КТМ прямого сжатия, причём величина $k = 127$ для KrF-лазера с $E_L = 1,3$ МДж и $k = 155$ для KrF-лазера с $E_L = 3,1$ МДж. Для $k = 127$ КТМ имеет следующие параметры: тонкая СН-оболочка ($\varnothing \sim 4$ мм, $\Delta R = 1$ мкм) с прилегающим слоем «полимерная пена + D—Т» ($W_p = 261$ мкм), за которым идёт твёрдый слой из чистого D—Т-топлива ($W = 190$ мкм). СН-оболочка покрыта верхним защитным слоем (300 мкм) из материала с высоким Z (например, золотом), чтобы противостоять тепловой нагрузке на КТМ в реакторной камере. Время формирования КТМ класса CHGT указано в табл. 1.

Функционирование FST-МФ поточного типа осуществляется по единому принципу для КТМ различного дизайна. Далее мы рассмотрим некоторые из наиболее важных вопросов, связанных с практическим осуществлением работы FST-МФ в частотном режиме. Рис. 1, *а* иллюстрирует работу модуля FST-формирования и взаимное расположение основных функциональных узлов. На рис. 1, *б* показаны основные элементы FST-МФ.

Цикл формирования КТМ в FST-МФ реализуется следующим образом. Находящиеся в мишенном контейнере (МК) оболочки с жидким (или газообразным) топливом инжектируются в канал формирования (КФ), который представляет собой специальную вставку в криостат в виде вакуумированной металлической спиральной трубки с охлаждаемыми стенками. В КФ оболочки с топливом движутся в быстрой последовательности, одна за другой, что обеспечивает частотную инжекцию готовых КТМ в тестовую камеру (ТК). Два физических принципа положены в основу метода FST: динамическая симметризация жидкого слоя, обусловленная свободным вращением КТМ при её движении в КФ; вымораживание топлива на внутренней поверхности оболочки за счёт контактной теплопроводности между движущейся оболочкой и холодной стенкой КФ. При этом реализуются высокие скорости охлаждения (1—50 К/с) и малое время формирования твёрдого слоя, что позволяет получить разупорядоченные структуры с большой плотностью дефектов, т.е. изотропную среду, или так называемые ультрадисперсные слои с мелкозернистой или нанокристаллической структурой. Таким образом, метод FST позволяет охладить и симметризовать топливо в скоростном режиме внутри движущейся КТМ. Особо подчеркнём, что метод FST органически сочетается со схемой применения бесподвешенной движущейся оболочки, что является необходимым условием при создании реакторных технологий. Общий вид установки с FST-МФ (*а*) и набор спиральных КФ, выполненных в различной конфигурации, показаны на рис. 2. Чтобы оптимизировать процесс FST-формирования, необходимо иметь данные о величине времени τ_{form} для различных материалов и

Рис. 2. Общий вид установки с FST-МФ (*а*) и набор спиральных КФ, выполненных в различной конфигурации: *б* — в виде классической цилиндрической спирали (спираль может быть одиночной (1S), двойной (2S) или даже тройной (3S)); *в* — канал с переменным шагом спирали в сравнении с одиночной равномерной спиралью (*г*)

геометрии КТМ. Кроме того, важны данные о величине допустимых вариаций начальной температуры T_{in} на входе КТМ в КФ (если таковые наличествуют), так как именно эта величина напрямую определяет время динамической симметризации топливного слоя. Ещё один важный момент. При движении КТМ в КФ должен быть реализован именно режим качения (без какого-либо проскальзывания) с тем, чтобы

обеспечить требуемый уровень симметризации слоя, а также сохранить качество внешней оболочки КТМ. Результат оптимизации считается достигнутым, если выполнено соотношение времён, а именно геометрия КФ должна быть такова, чтобы время качения оболочки τ_{rol} (время пребывания в КФ) было больше, нежели время формирования топливного слоя τ_{form} . Для проведения экспериментов разрабатываются КФ различного дизайна:

- цилиндрические (широкие и узкие при вертикальной или наклонной геометрии эксперимента);
- спиральные (причём спираль может быть одиночной (1S, двойной (2S) или тройной (3S));
- комбинированные (могут состоять из нескольких спиралей, для каждой из которых существует свой набор параметров).

Проведённые исследования показали, что КТМ (например, класса HiPER), для которых величина $\tau_{\text{form}} < 15$ с (см. табл. 1), могут быть сформированы с использованием КФ в виде одиночной спирали (см. рис. 1, б (4), 1S-КФ с цилиндром намотки). В противном случае необходимо переходить к КФ в виде двойной или даже тройной спирали (см. рис. 2, б), а также к комбинированным КФ с переменным шагом спирали (см. рис. 2, в). Варианты намотки спиралей для различных КФ показаны на рис. 1, б (6). Отметим, что сопряжение одной спирали с другой для комбинированных КФ должно выполняться с помощью переходных кривых, например, спирали Корню.

Так как для КТМ реакторного класса $\tau_{\text{form}} > 15$ с (см. табл. 1), то наша задача заключается в том, чтобы определить тип КФ и его параметры для КТМ класса CHGT. Мы начнём рассмотрение с простого 1S-КФ, геометрия которого представляет собой одиночную спираль со следующими рабочими параметрами (рис. 3, а, б): угол захода спирали α , общая длина спирали L_0 , её шаг h , высота H_0 и диаметр $D = 2R_0$. На рис. 3, в показан 1S-КФ в экспериментальной сборке.

Уравнения движения КТМ. В общем случае движение КТМ реализуется в следующих трёх модах:

- КТМ скользит по поверхности КФ (присутствует только скольжение без вращения);
- КТМ катится с проскальзыванием;
- КТМ катится вдоль поверхности КФ без проскальзывания: режим чистого качения.

Для определения условий, отвечающих за реализацию того или иного режима движения КТМ, рассмотрим спиральный КФ радиусом R_0 (см. рис. 3, а, б). В каждой точке спирали касательная имеет постоянный наклон к горизонтальной плоскости под углом α (угол захода спирали). Пусть сферическая КТМ радиусом R и массой m движется по такому каналу со скоростью V . При этом возникает сопротивление движению в виде трения качения. Пара $T, F_{\text{тр}}$ стремится привести КТМ в движение, пара P, N препятствует движению. Момент пары P, N называется моментом сопротивления качению. Причина появления трения качения заключается в следующем. Под действием силы тяжести оболочка, находящаяся на поверхности стенки КФ, деформируется. Вследствие этого она опирается не на одну точку, как в случае абсолютно твёрдых тел, а на площадку больших или меньших размеров — так называемое пятно контакта (область ac на рис. 3, б). Это приводит к тому, что приложение сил реакции опоры будет находиться в некоторой точке этой площадки (точка ϵ на рис. 3, б). Другими словами, когда оболочка начинает катиться, точка ϵ смещается немного вперёд от вертикали, проходящей через центр тяжести тела. Таким образом, реакция стенки КФ на оболочку с топливом состоит из нормальной реакции опоры N (данная сила будет направлена вдоль координатной оси Y), касательной реакции опоры $F_{\text{тр}}$ (сила трения направлена вдоль координатной оси X) и пары трения качения P, N с моментом сопротивления качению. Отметим,

Рис. 3. Параметры КФ, используемые в расчётах: а — экспериментальный КФ; б — модельное изображение КФ (сверху) и схема (снизу) возникновения сопротивления при качении мишени вдоль КФ; в — вставка в криостат в сборке с КФ для проведения экспериментов по методу FST

что серьёзной проблемой при реализации условия качения является выбор материалов и определение коэффициента трения качения. Эта величина зависит от материалов оболочки и стенки КФ, а также физического состояния их поверхностей: чем поверхности твёрже и чем выше класс чистоты обработки (например, поверхности шлифованы), тем он будет меньше. Строго говоря, коэффициент трения качения должен зависеть ещё от радиусов кривизны поверхностей в точке касания, а также от удельной нагрузки, приходящейся на единицу поверхности соприкосновения. Поэтому на практике коэффициент трения качения определяется экспериментально. Он изменяется в весьма широких пределах — от 0,0005 см до величины, превышающей 1 см (например, в высших кинематических парах). Подчеркнём, что условие на качение оболочки без проскальзывания определяется соотношением действующих сил и зависит от параметров задачи, которые эти силы определяют, в первую очередь, от коэффициентов трения качения и трения скольжения.

Итак, пусть оболочка с топливом движется вдоль КФ (см. рис. 3, а, б). Её движение определяется следующей системой уравнений [13]:

— уравнение движения центра тяжести КТМ

$$\frac{dV}{dt} = g \sin \alpha - \frac{F_{\text{тр}}}{m}; \quad (1)$$

— уравнение её вращения относительно оси, проходящей через центр тяжести КТМ:

$$\frac{J}{R} \frac{d\omega}{dt} = F_{\text{тр}} - k_r N, \quad (2)$$

где J и ω — момент инерции и угловая скорость вращения КТМ; k_r — коэффициент трения качения; g — ускорение свободного падения. К этой системе необходимо добавить уравнение кинематической связи ($V = \omega R$), которое получается из условия, что КТМ скатывается без проскальзывания, т.е. скорость точки ε равна нулю (см. рис. 3, б). Используя полученные выражения, запишем силу трения в виде

$$F_{\text{тр}} = \frac{J}{R^2} \frac{dV}{dt} + k_r N. \quad (3)$$

Подставляя выражение (3) для силы $F_{\text{тр}}$ в (1), получим уравнение движения КТМ вдоль КФ

$$(1 + \zeta) \frac{dV}{dt} = g \sin \alpha - \frac{k_r N}{m}, \quad \zeta = \frac{J}{mR^2}. \quad (4)$$

Условие на качение без проскальзывания определяется известным соотношением

$$F_{\text{тр}} \leq F_{\text{max}}, \quad F_{\text{max}} = k_s N. \quad (5)$$

Коэффициент трения скольжения k_s считается заданным, силу реакции опоры N со стороны стенки КФ запишем в виде

$$N = m \cos \alpha \sqrt{g^2 + \frac{V^4 \cos^2 \alpha}{R_0^2}}, \quad (6)$$

где второе слагаемое под корнем представляет собой квадрат центростремительной силы. Теперь, используя выражение (3) для силы трения, а также соотношение (5), запишем условие на движение КТМ без проскальзывания

$$\zeta \frac{dV}{dt} \geq \frac{(k_s - k_r) N}{m}. \quad (7)$$

Сделав соответствующие подстановки из (4), окончательно получим

$$\zeta g \sin \alpha \leq [(1 + \zeta) k_s - k_r] N / m. \quad (8)$$

Для практических целей, используя выражение (6), удобно перейти в (8) на ограничение по скорости движения КТМ:

$$V \geq V_0 = \frac{\sqrt[4]{(\eta^2 \tan^2 \alpha - 1) R_0^2 g^2 \cos^2 \alpha}}{\cos \alpha}, \quad \eta = \frac{\zeta}{(1 + \zeta) k_s - k_r}. \quad (9)$$

По умолчанию при вычислении V_0 (пороговое значение скорости при смене режима качения) предполагается, что подкоренное выражение в (9) неотрицательно. Тогда если скорость движения КТМ меньше критического значения V_0 , то она скользит по стенке КФ, так как нарушено условие (5) для силы трения, определяемой выражением (3). В противном случае (подкоренное выражение в (9) отрицательно, т.е. не существует порогового значения скорости) оболочка начинает катиться с первого же момента движения ($V_0 = 0$). Именно это условие необходимо реализовать при движении КТМ любого класса вдоль КФ, что диктуется принципиальными ограничениями при построении FST-МФ. Акцентируем основные положения:

— необходимо исключить скольжение оболочки по поверхности КФ, чтобы добиться требуемой симметризации слоя, а также сохранить качество внешней поверхности оболочки КТМ;

— необходимо обеспечить такие углы захода спирали, чтобы реализовать требуемое время пребывания КТМ в КФ, или, другими словами, время качения КТМ должно быть достаточным для вымораживания твёрдого слоя топлива на внутренней поверхности полимерной оболочки. Таким образом, если в режиме качения выполнено соотношение времён, а именно

$$\tau_{\text{form}} \leq \tau_{\text{rol}}, \quad (10)$$

то результат оптимизации считается достигнутым. Учитывая сказанное, при переходе к угловым характеристикам КФ ограничение (9) можно сформулировать в следующем виде: чтобы оболочка катилась без проскальзывания, необходимо выполнить условие на ограничение угла захода спирали сверху

$$\text{tg} \alpha \leq \text{tg} \alpha_{\text{max}} = \frac{(1 + \zeta)k_s - k_r}{\zeta}. \quad (11)$$

Отметим, что качение с ускорением продолжается до тех пор, пока правая часть дифференциального уравнения (4) положительна. После того, как достигается равенство нулю правой части (4), оболочка катится с постоянной скоростью

$$V_{\text{max}} = \frac{\sqrt[4]{(\text{tg}^2 \alpha / k_r^2 - 1)R_0^2 g^2 \cos^2 \alpha}}{\cos \alpha}. \quad (12)$$

Выражение (12) позволяет определить минимальный угол, с которого оболочка начнёт катиться вдоль КФ. Подкоренное выражение в (12) должно быть неотрицательно, что позволяет получить ограничение снизу на угол захода спирали при конструировании КФ:

$$\text{tg} \alpha_{\text{min}} = k_r. \quad (13)$$

Учитывая полученные результаты (формулы (11) и (13)), запишем рабочий диапазон углов качения $\Delta \alpha$, который будет определяться двойным неравенством

$$k_r = \text{tg} \alpha_{\text{min}} < \text{tg} \alpha < \text{tg} \alpha_{\text{max}} = \frac{(1 + \zeta)k_s - k_r}{\zeta}, \quad (14)$$

$$\alpha_{\text{min}} \approx \alpha_{\text{max}} \quad \text{при} \quad k_r \approx k_s.$$

Для величины ζ справедливо двойное неравенство $2/5 \leq \zeta < 2/3$ [13]. Левая часть станет равенством, если вся масса КТМ равномерно распределена по её объёму. Правая часть отвечает тому случаю, когда масса КТМ сосредоточена в её оболочке.

Для диапазона углов (14) оболочка с топливом движется по КФ в режиме качения с ускорением. Предельное значение угла захода спирали α_{max} при изменении коэффициента трения скольжения показано на рис. 4. Используя уравнение (4), время качения можно записать в виде

Рис. 4. Предельное значение угла захода спирали α_{max} при изменении коэффициента трения скольжения

$$\tau_{\text{rot}} = (1 + \zeta) \int_{V_i}^{V_f} \frac{dV}{g \sin \alpha - k_r \sqrt{g^2 \cos^2 \alpha + V^4 \cos^4 \alpha / R_0^2}}, \quad (15)$$

где V_i — начальная скорость КТМ при входе в КФ, величина которой определяется условием проведения экспериментов. Величину V_f (конечная скорость КТМ на выходе из КФ) можно найти, решая уравнение

$$L = (1 + \zeta) \int_{V_i}^{V_f} \frac{V dV}{g \sin \alpha - k_r \sqrt{g^2 \cos^2 \alpha + V^4 \cos^4 \alpha / R_0^2}}, \quad (16)$$

где L — полная длина спирали.

Выбор материалов при моделировании КФ. Ранее уже отмечалось, что к основным параметрам задачи относятся, прежде всего, коэффициенты трения скольжения и качения. По этой причине мы начнём с анализа данных по коэффициентам трения. Условно принято называть материалы с коэффициентами трения скольжения более 0,2 фрикционными, а менее 0,2 — материалами с низким трением, или антифрикционными. Хотя исследования по моделированию фрикционного поведения продолжаются, лабораторные эксперименты остаются единственным практическим методом, доступным для точной идентификации коэффициентов трения для произвольных пар материалов. Однако даже в лабораторных условиях точное и повторяемое измерение коэффициента трения остаётся сложной задачей из-за зависимости коэффициентов трения от материалов, находящихся в контакте, скорости скольжения, контактного давления, окружающей среды, чистоты, нормальной величины нагрузки, топографии поверхности и многих других факторов. Поскольку моделирование фрикционного поведения при качении представляет собой особо сложную задачу, а измерения значений для коэффициента трения качения из различных источников не всегда согласованы, то единственный оптимальный вариант — это проведение сравнительного анализа для различных условий качения, т.е. в широком диапазоне изменения коэффициентов трения скольжения и трения качения.

Характерные данные по трению скольжения [14, 15] для некоторых пар материалов представлены в табл. 2 и 3.

Т а б л и ц а 2. Антифрикционные полимерные материалы (полимер/сталь)

Полимер	Коэффициент трения	Полимер	Коэффициент трения
ПА	0,10—0,20	ПК	0,3
ПТФЭ	0,10—0,15	ПП	0,3—0,4
ПЭ	0,10—0,15	ЭС	0,15—0,25
ПФ	0,15—0,20	ФФС	0,15—0,25

Примечание. Приняты следующие обозначения: полиамид (ПА), политетрафторэтилен (ПТФЭ), полиэтилен (ПЭ), полиформальдегид (ПФ), поликарбонат (ПК), полипропилен (ПП), эпоксидная смола (ЭС), фенолформальдегидная смола (ФФС).

Т а б л и ц а 3. Фрикционные полимерные материалы

Пары материалов	Коэффициент трения
Плексиглас—плексиглас	0,8
Плексиглас—сталь	0,4—0,5
Полистирол—полистирол	0,5
Полистирол—сталь	0,3—0,35

В наших расчётах эти значения будут являться некоей реперной точкой при определении вариаций в величине коэффициента трения качения. В случаях полимеров с низким коэффициентом трения скольжения сила сопротивления качению намного меньше, чем сила, связанная со скольжением. Типичные значения коэффициента трения качения как минимум в 5—10 раз меньше, чем в случае скольжения. На рис. 4 и 5 представлены результаты, относящиеся к таким полимерам, причём коэффициент трения ка-

чения является параметром задачи (предельное значение модели $k_t \sim k_s$). Если угол спирали лежит вне зоны «чистое качение», то движение оболочки начинается со скольжения и углы $\alpha > 5,7^\circ$ (см. рис. 5) должны быть исключены из рассмотрения при проектировании FST-МФ. Эти результаты были использованы при разработке КФ для КТМ класса HiPER ($\varnothing \sim 2$ мм), для которого угол захода спирали составил $\alpha \sim 5^\circ$ [8].

Для КТМ реакторного класса ($\varnothing \sim 4$ мм) величина угла захода спирали в КФ должна быть больше (больше и величина k_s (14)), чтобы обеспечить требуемые скорости вращения оболочки для достижения необходимого уровня симметризации слоя. На рис. 6 представлен рабочий диапазон углов для фрикционных полимеров ($k_s = 0,3$) при вариации коэффициента трения качения. На основании полученных результатов были выбраны два значения угла α : $11,5^\circ$ и $16,7^\circ$ (соответственно в ~ 2 и 3 раза больше, чем для КТМ класса HiPER). Кроме того, поскольку время формирования для КТМ реакторного класса CHGT превышает время формирования КТМ класса HiPER (в зависимости от их дизайна) от 2 до 3 раз (см. табл. 1), были изготовлены прототипы КФ в виде двойной и тройной спиралей.

Расчёт времени качения КТМ в КФ. Это время будет зависеть от полной длины спирали (одиночной, двойной или тройной):

$$\int_0^{\tau_{\text{rol}}} V(t) dt = L = H_0 / \sin \alpha. \quad (17)$$

Чтобы оптимизировать процесс FST-формирования для КТМ класса CHGT, необходимо иметь более точные данные (по сравнению с табл. 1) по времени формирования слоя для различного вида топлива ($D_2/D-T$) с учётом вариации начальной температуры T_{in} при подаче КТМ на вход КФ. Детальный расчёт всей процедуры формирования выполнен в работе [11]. Для создания численного кода был предложен подход, основанный на решении краевой задачи Стефана [16, 17], описывающей изменение фазового состояния топливного вещества внутри оболочки (газ, жидкость, твёрдое тело), при котором положение границы раздела фаз изменяется со временем. Полученные результаты:

— $T_{\text{in}} = T_s \sim 35$ К: $\tau_{\text{form}} = 22,45$ с для D_2 -топлива и $\tau_{\text{form}} = 28,52$ с для $D-T$ -топлива;

— $T_{\text{in}} = T_d \sim 28$ К: $\tau_{\text{form}} = 12,05$ с для D_2 -топлива и $\tau_{\text{form}} = 14,25$ с для $D-T$ -топлива,

где T_s — температура начала разделения топлива на жидкий и газообразный компоненты; T_d — температура сброса давления в МК, при которой избыточное топливо удаляется из МК (см. рис. 1, а). Отметим, что в зависимости от прочности оболочки T_d может составлять величину $\sim T_s$.

Для проведения экспериментов по определению времени качения τ_{rol} и последующего сравнения его величины с расчётными значениями τ_{rol} и τ_{form} были изготовлены и испытаны несколько макетов КФ в форме цилиндрической спирали с вертикальной осью симметрии и с числом спиралей $n = 2, 3$. Макеты изготовлены из калиброванных цельнотянутых бесшовных трубок круглого сечения из отожжённой меди, в том числе:

— из меди марки ASTM B280 C12200, степень очистки 99,97%; параметры трубок: внешний диаметр $1/4"$ (6,35 мм), толщина стенки 0,03" (0,76 мм);

Рис. 5. Полимеры с низким коэффициентом трения скольжения ($k_s = 0,05$): рабочее поле углов захода спирали при изменении коэффициента трения качения

Рис. 6. Фрикционные полимерные материалы ($k_s = 0,3$): рабочее поле углов захода спирали при изменении коэффициента трения качения

— из меди марки М2к (ГОСТ 859-2001), степень очистки 99,93%; параметры трубок: внешний диаметр 4 мм, толщина стенки 0,5 мм и внешний диаметр 5 мм, толщина стенки 1 мм (трубки изготовлены по спецзаказу).

Для экспериментов были отобраны следующие суррогатные мишени: стальные шарики диаметром 2 мм и весом 30 мг и 10 оболочек из полистирола производства ФИАН. Измерение диаметра оболочек осуществлялось на микроскопе типа ИМЦЛ-100х50А (Приборостроительный завод, Новосибирск, Россия), точность измерения $\pm 0,2$ мкм. Измерение веса оболочек осуществлялось с помощью аналитических лабораторных весов типа МХА 2/1-SensorDisplay (фирма Radwag, Польша), точность измерения $\pm 0,1$ мкг.

КФ в виде двойной спирали (2S-КФ). Его параметры: базовый дизайн (дизайн № 1 = спираль 1 + спираль 2), угол захода каждой спирали $\alpha = 11,5^\circ$, радиус каждой спирали $R_0 = 21$ мм, высота каждой спирали $H_0 = 450$ мм, длина каждой спирали $L_0 = 2,261$ м, общая длина двух спиралей $L = 4,52$ м, среднее время качения $\tau_{\text{тол}} = 23,46$ с (табл. 4)

Т а б л и ц а 4. Измерение времени качения

№ проброса	$\tau_{\text{тол}}, \text{с}$	
	Стальной шарик	СН-оболочка
1	17,50	23,56
2	17,58	22,88
3	17,75	23,76
4	17,57	23,68
5	17,65	23,43
Σ	88,05	117,31
Среднее	17,61	23,46

Время качения является численным решением системы нелинейных уравнений (15)–(17). Результаты расчётов представлены на рис. 7 и 8. Диаграмма движения СН-оболочки вдоль КФ (скорость оболочки в зависимости от времени) показана на рис. 7. Хорошо видно, что через ~ 17 с после начала движения её скорость достигает максимума $V_{\text{max}} = 0,2$ м/с и больше уже не меняется со временем. Зависимость пути $S(t)$ для СН-оболочки показана на рис. 8. Его максимальное значение должно быть равно общей длине двух спиралей $S_{\text{max}} = L = 4,52$ м. Согласно расчётам через 23,49 с после начала движения оболочка пройдёт путь, равный 4,5 м, следовательно, расчётные данные по времени качения соответствуют результатам эксперимента, представленным в табл. 4 для КФ в виде двойной спирали с углом захода $\alpha = 11,5^\circ$.

Рис. 7. Диаграмма движения оболочки по двуспиральному КФ с углом захода $\alpha = 11,5^\circ$: скорость как функция времени Рис. 8. Диаграмма движения оболочки по 2S-КФ с углом захода $\alpha = 11,5^\circ$: путь как функция времени

Теперь сравним это время ($\tau_{\text{тол}} = 23,49$ с) с величиной времени формирования КТМ класса СНГТ для двух значений температуры T_{in} :

— $T_{\text{in}} \sim T_s = 35$ К — как для D_2 -, так и для D—Т-топлива параметры КФ позволяют выполнить критерий (10) и сформировать реакторную КТМ методом FST;

— $T_{\text{in}} \sim T_d = 28$ К — для D_2 -топлива критерий (10) выполнен;

— $T_{\text{in}} \sim T_d = 28$ К — для D—Т-топлива критерий (10) нарушен ($\tau_{\text{form}} = 28,5$ с и $\tau_{\text{тол}} = 23,49$ с).

Тем не менее двойная спираль может использоваться в КФ и в третьем случае, поскольку если угол спирали слегка изменяется вдоль её длины, то можно соответственно уменьшить или увеличить

скорость качения, а значит и время качения. Кроме того, спираль 2 можно продлить (в нашем случае на $\sim 1,7$ м), как показано на рис. 9, чтобы критерий (10) был выполнен с запасом. Таким образом, наши расчёты показывают, что КТМ реакторного класса могут быть сформированы методом FST с использованием КФ в виде двойной спирали.

Рис. 9. 2S-КФ с дополнительной рабочей спиралью для увеличения времени качения

КФ в виде тройной спирали (3S-КФ). Технические характеристики:

— базовый дизайн (дизайн № 1 = спираль 1 + спираль 2 + спираль 3): $\alpha = 16,7^\circ$, $R_0 = 21$ мм, $H_0 = 88$ см, $L_0 = 3,066$ м, $L = 9,187$ м;

— дополнительный дизайн (дизайн № 2 = спираль 1 + спираль 2 + спираль 3 + спираль 4). Спираль 4: $\alpha_4 = 3^\circ$, $R_4 = 21$ мм, $H_4 = 10,8$ см, $L_4 = 2,7$ м, общая длина двух спиралей (спираль 3 + спираль 4) $L_{3,4} = 5,136$ м. Другими словами, этот КФ в виде тройной спирали разработан в специальной конфигурации с дополнительной короткой спиралью 4 (комбинированный КФ).

Время качения рассчитаем, как и прежде, решая уравнения (15)—(17). Результаты расчётов представлены на рис. 10, на котором хорошо видно, что через ~ 5 с после начала движения скорость достигает максимума $V_{\max} = 0,3$ м/с и больше не меняется со временем, как и в случае двойной спирали. Это соответствует длине пути $S = 0,7$ м. После этого движение оболочки вдоль спирали осуществляется с постоянной скоростью 0,3 м/с. Поскольку общая длина тройной спирали составляет $L = 9,187$ м, то время этого движения $\tau_{\text{тол}}^* = (9,187 - 0,7)/0,3 = 28,29$ с. Тогда полное время качения составит величину $\tau_{\text{тол}} = (28,29 + 5) \text{ с} = 33,29$ с, что превышает время формирования $\tau_{\text{форм}} = 28,5$ с как для D_2 -, так и для D—Т-топлива. Это означает, что КТМ реакторного класса могут быть сформированы методом FST с использованием КФ в виде тройной спирали.

Рис. 10. Диаграмма движения оболочки по 3S-КФ с углом захода $\alpha = 16,7^\circ$: скорость оболочки в зависимости от времени (соответствующая длина пути указана для каждой ординаты отдельно)

Отметим, что тройная спираль также может иметь дополнительную, так что две спирали «спираль 3 + спираль 4», собранные в последовательности одна за другой, образуют комбинированный КФ. В этом случае роль дополнительной спирали состоит в том, чтобы затормозить движение КТМ и практически обнулить скорость на выходе из FST-МФ, если это необходимо по условиям эксперимента. Например, если скорость $V_{\max} = 0,3$ м/с является критичной с точки зрения прочности оболочки и требуется избежать разрушения КТМ при её инъекции в ТК. Расчёты показывают, что при параметрах спирали 4, указанных в дизайне № 2, это займёт не более 1,5 с для величины угла захода $\alpha = 3^\circ$.

Для удобства сравнения полученные результаты исследования обобщены в табл. 5.

Таблица 5. Сравнительные данные FST-формирования для дизайна СНГТ

D ₂ -топливо			
Расчёт			Эксперимент
$T_{\text{ин}}, \text{ K}$	$\tau_{\text{форм}}, \text{ с}$	$\tau_{2\text{тол}}, \text{ с}$	$\tau_{2\text{тол}}, \text{ с}$
35,0	22,45	23,49 (простой КФ)	23,46
27,5	12,05		
D—Т-топливо			
Расчёт			Эксперимент
$T_{\text{ин}}, \text{ K}$	$\tau_{\text{форм}}, \text{ с}$	$\tau_{3\text{тол}}, \text{ с}$	$\tau_{3\text{тол}}, \text{ с}$
37,5	28,52	33,29 (простой КФ)	~35
28,0	14,25	34,79 (комбинированный КФ)	

Примечание. $\tau_{2\text{тол}}$ и $\tau_{3\text{тол}}$ — время качения для двойной и тройной спирали соответственно, методологически экспериментальное значение $\tau_{3\text{тол}}$ определялось аналогично $\tau_{2\text{тол}}$ (см. табл. 4).

Таким образом, результаты, полученные в ходе математического и экспериментального моделирования, находятся в хорошем согласии друг с другом, что позволяет определить требуемые параметры КФ, при которых критерий (10) будет выполнен для КТМ реакторного класса. Это открывает широкие возможности для формирования топливного слоя в движущихся оболочках, а значит, создаёт новое направление в производстве КТМ, основанное на поточном (или, другими словами, «конвейерном») способе их производства для обеспечения работы реактора на основе управляемого ИТС.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В настоящее время быстрыми темпами развиваются те области исследований, которые связаны с разработкой специализированного модуля формирования для частотного и дешёвого производства топлива в системах управляемого термоядерного синтеза с инерциальным удержанием плазмы. В настоящей статье представлены результаты экспериментального и теоретического цикла исследований, полученные в области построения такого модуля (FST-МФ) для КТМ реакторного класса. Показано, что перспективным путём решения проблемы массового производства реакторных КТМ является реализация технологий на основе метода FST, дальнейшее развитие которых осуществляется в ФИАН в рамках программы по созданию модульного варианта фабрики КТМ для лазерных установок различного класса.

Работа выполнена в рамках проекта МАГАТЭ № 20344, а также в рамках ГЗ ФИАН по теме № 2 «Физические основы лазерных, фотонных и оптоэлектронных технологий и взаимодействие лазерного излучения с веществом для решения задач навигации, УТС, информатики и биомедицины».

REFERENCES

1. **Aleksandrova I.V., Koresheva E.R., Krokhin O.N., Osipov I.E.** Cryogenic hydrogen fuel for controlled inertial confinement fusion (review of world results). — VANT. Ser. Termoyadernyi sintez (Problems of Atomic Science and Technology. Ser. Thermonuclear Fusion), 2015, vol. 38, issue 1, p. 57 (in Russian).
2. **Prencipe I., Fuchs J., Pascarelli S., Schumacher D.W., Stephens R.B., Alexander N.B., Briggs R., Büscher M., Cernaianu M.O., Choukourov A., De Marco M., Erbe A., Fassbender J., Fiquet G., Fitzsimmons P., Gheorghiu C., Hund J., Huang L.G., Harmand M., Hartley N.J., Irman A., Kluge T., Konopkova Z., Kraft S., Kraus D., Leca V., Margarone D., Metzkes J., Nagai K., Nazarov W., Lutoslawski P., Papp D., Passoni M., Pelka A., Perin J.P., Schulz J., Smid M., Spindloe C., Steinke S., Torchio R., Vass C., Wiste T., Zaffino R., Zeil K., Tschentscher T., Schramm U., Cowan T.E.** Targets for high repetition rate laser facilities: needs, challenges and perspectives. — High Power Laser Science and Engineering, 2017, vol. 5, p. e17.
3. **Mori Y., Nishimura Y., Ishii K., Hanayama R., Kitagawa Y., Sekine T., Takeuchi Y., Satoh N., Kurita T., Kato Y., Kurita N., Kawashima T., Komeda O., Hioki T., Motohiro T., Sunahara A., Sentoku Y., Miura E., Iwamoto A., Sakagami H.** 1-Hz bead-pellet injection system for fusion reaction engaged by a laser HAMA using ultra-intense counter beams. — Fusion Science and Technology, 2019, vol. 75, p. 36.
4. **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, p. e11.
5. **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.
6. **Aleksandrova I.V., Koresheva E.R., Koshelev E.L.** Cryogenic direct compression targets with high energy output: diffusion filling with fuel. — Kratkie soobshcheniya po fizike (Short messages on physics), 2017, № 12, p. 19 (in Russian).
7. **Aleksandrova I.V., Belolipetskiy A.A., Koresheva E.R., Koshelev E.L., Osipov I.E., Safronov A.I., Timasheva T.P., Shcherbakov V.I.** Optimization steps to filling a batch of hiper-scale shells from full-density and porous polymers with a highly-pressurized D₂/DT fuel (1000 atm): results of modeling and experiments. — VANT. Ser. Termoyadernyi sintez (Problems of Atomic Science and Technology. Ser. Thermonuclear Fusion), 2011, issue 4, p. 22 (in Russian).
8. **Aleksandrova I.V., Belolipetskiy A.A., Kalabuhov V.A., Koresheva E.R., Koshelev E.L., Kutergin A.I., Nikitenko A.I., Osipov I.E., Panina L.V., Safronov A.I., Timasheva T.P., Timofeev I.D., Usachev G.S.,**

- Chtcherbakov V.I., Tolley M., Edwards C., Spindloe C.** FST-technologies for high rep-rate production of HiPER-scale cryogenic targets. — In: Proc. of SPIE, 2011, vol. 8080, p. 80802M
9. **Koresheva E.R., Aleksandrova I.V., Akunets A.A., Bezotosnyi P.I., Blokhin I.S., Gavrilkin S.Yu., Ivanenko O.M., Koshelev E.L., Mitsen K.V., Panina L.V.** Cryogenic fuel targets delivery for laser thermonuclear fusion. Patent of RF № 2635660, 15 November 2017 (in Russian).
 10. **Aleksandrova I.V., Koshelev E.L., Nikitenko A.I., Timasheva T.P., Koresheva E.R.** Magnetic acceleration of the levitating sabot made from Type-II superconductors. — J. Russian Laser Research, 2018, vol. 39(2), p. 140.
 11. **Aleksandrova I.V., Koresheva E.R.** Advanced fuel layering in line-moving, high-gain direct-drive cryogenic targets. — High Power Laser Science and Engineering, 2019, vol. 7, p. e38.
 12. **Bodner S.E., Colombant D.G., Schmitt A.J., Klapisch M.** High gain target design for laser fusion. — Phys. Plasmas, 2000, vol. 7(6), p. 2298.
 13. **Arnol'd V.I.** Mathematical methods of classical mechanics. — URSS, Edition 6, 2017. 416 p. (in Russian).
 14. **Bartenev G.M., Lavrent'ev V.V.** Friction and wear of polymers. — Leningrad: Khimiya (Chemistry), 1972. 240 p. (in Russian).
 15. **Kryzhanovskiy V.K., Burlov V.V., Panimatchenko A.D., Kryzhanovskaya Yu.V.** Technical properties of polymer materials. Reference book. 2-d ed., enlarged. — StPb: Pub.house «PROFESSION», 2007. 280 p. (in Russian).
 16. **Tikhonov A.N., Samarskiy A.A.** Equations of mathematical physics. — M.: Pub.house of MSU, 1999 (in Russian).
 17. **Samarskiy A.A., Mikhaylov A.P.** Mathematical simulation. Ideas. Methods. Examples. — M.: Fizmatlit (PhysMathLit), 2001 (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

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

Timasheva T.P. P.N. Lebedev Physical Institute of the Russian Academy of Sciences, Leninskij Prospekt 53, 119991 Moscow, Russia

Received 18 February 2020

Revised 20 March 2020

Accepted 15 May 2020

Problems of Atomic Science and Technology
Ser. Thermonuclear Fusion, 2020, vol. 43, issue 2, pp. 67—79