

УДК 621.039.633

КРИОГЕННЫЕ МИШЕНИ ПРЯМОГО СЖАТИЯ С ВЫСОКИМ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИМ ВЫХОДОМ: ФОРМИРОВАНИЕ МЕТОДОМ FST

И. В. Александрова, Е. Р. Корешева

Обсуждается один из ключевых вопросов в программе ИТС – разработка методов быстрого формирования криогенных топливных мишеней (КТМ) для подачи их в фокус мощной лазерной установки или реактора ИТС. Представлены результаты моделирования временных параметров процесса формирования КТМ реакторного класса методом FST (Free-Standing Targets). Дизайн КТМ включает полые оболочки диаметром 4 мм из компактных и пористых полимеров, содержащие на внутренней поверхности твердое водородное топливо. Показано, что время формирования криогенного слоя в мишенях не превышает 30 с, что позволяет, на основе метода FST, реализовать поточное производство КТМ для реактора.

Ключевые слова: инерциальный термоядерный синтез (ИТС), реакторные мишени, метод FST.

Введение. Для эффективной работы реактора ИТС необходимо, чтобы зона термоядерного горения пополнялась топливом с частотой ~ 1 миллион КТМ в день. Поэтому фабрика КТМ является неотъемлемой частью реактора, задачей которой является производство необходимого количества бесподвесных КТМ и их подача в криогенный инжектор. Ключевая проблема при создании фабрики – это уход от традиционных технологий, которые позволяют работать лишь с одной КТМ, укрепленной на специальном подвесе, поскольку такие технологии позволяют осуществлять ИТС-эксперименты по сжатию топлива исключительно в однократном режиме. Время формирования криогенного слоя традиционным способом велико и составляет более 30 ч на одну КТМ [1], что также не может служить основой для создания реакторных технологий.

ФИАН, 119991 Россия, Москва, Ленинский пр-т, 53; e-mail: koreshevaer@lebedev.ru.

На сегодняшний день единственной альтернативой традиционным технологиям служит разработанный в ФИАН метод FST, который может обеспечить быстрое формирование массива бесподвесных КТМ и их инжекционную доставку в камеру взаимодействия с мощным лазерным излучением [2, 3]. В настоящей работе проведено моделирование времени формирования криогенного слоя в КТМ реакторного класса при её изготовлении методом FST.

Метод FST. В основу метода положен принцип работы с движущимися бесподвесными КТМ. Согласно методу FST процесс формирования криогенного слоя осуществляется внутри массива движущихся оболочек при их гравитационном транспорте между элементами модуля формирования (МФ): мишенный контейнер (МК) – канал формирования (КФ) – тестовая камера (ТК). Рис. 1 иллюстрирует работу МФ и взаимное расположение основных функциональных узлов.

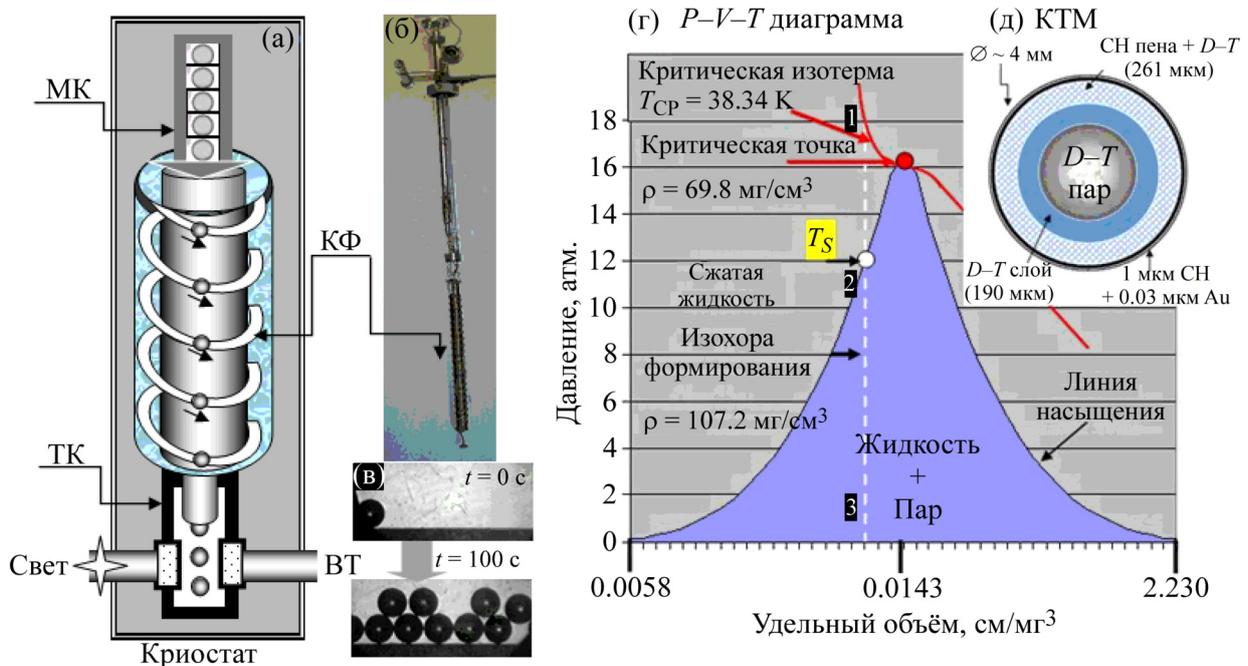


Рис. 1: Формирование КТМ методом FST: (а) схема МФ, (б) КФ в сборке с МК, (в) инжекция КТМ при $T = 4.2\text{ K}$ из КФ в ТК с частотой 0.1 Гц , (г) $P-V-T$ диаграмма при формировании криогенного D_2 -слоя в реакторной КТМ [4], (д) дизайн КТМ (одинаков как для D_2 , так и $D-T$ топлива).

Цикл формирования криогенного слоя реализуется следующим образом. Находящиеся в МК оболочки с жидким (или газообразным) D_2 или $D-T$ топливом инжектируют-

ся в КФ, который представляет собой вертикальную вставку в криостат, выполненную в виде вакуумированной спиральной трубки с охлаждаемыми стенками. Образование криогенного топливного слоя на внутренней поверхности движущейся оболочки происходит за счёт контакта оболочки с холодной стенкой КФ (рис. 1(а) и 1(б)). В КФ сферические оболочки движутся под действием сил гравитации одна за другой (рис. 1(а)), что позволяет реализовать частотную инжекцию готовых КТМ в ТК и осуществить формирование КТМ в непрерывном режиме или с необходимой частотой.

Подчеркнём, что в ФИАН впервые, на основе уникальной FST-технологии, было экспериментально продемонстрировано формирование криогенного слоя из изотопов водорода внутри движущихся КТМ, а также их инжекция при криогенной температуре ($T = 4.2$ К) в ТК с частотой 0.1 Гц (рис. 1(в)) [2]. Основные принципы метода FST:

– Симметризация расположения жидкого топлива осуществляется за счет свободного вращения КТМ при её качении вдоль КФ, изготавливаемого в виде спирали – одиночной, двойной или тройной;

– Быстрое вымораживание топлива (при скорости охлаждения $q = 1 - 50$ К/с) на внутренней поверхности полой полимерной оболочки за счет отвода тепла через пятно контакта между оболочкой КТМ и стенкой КФ;

– Высокоплавкие добавки к топливу позволяют сформировать с помощью метода FST твердый слой в устойчивом ультрадисперсном (нано структурном) состоянии, что минимизирует риск деградации слоя в процессе доставки КТМ в реактор ИТС. В качестве добавок служат изотопы водорода с более высокой тройной точкой, чем основное топливо (например, тритий в $D-T$ смеси), а также неон.

При конструировании МФ учитывается возможность его работы не только как автономного устройства, но и как интегральной части установки по частотному производству КТМ, их сборке со специальным носителем (саботом), а также инжекционной доставке КТМ в фокус мощной лазерной установки. В этом отношении важен тот факт, что ТК – это промежуточный узел между КФ и системой доставки. ТК фактически представляет собой накопитель КТМ (рис. 1(а) и 1(в)), который используется в текущих FST-экспериментах для температурной и оптической диагностики параметров готовых КТМ, а для реакторных КТМ будет служить промежуточным узлом для их транспорта и подачи в криогенный инжектор.

КТМ с высоким коэффициентом усиления по энергии. Возможность формирования КТМ реакторного класса методом FST была нами теоретически исследована на примере КТМ с высоким энергетическим выходом, предложенной в работе [4].

Такая КТМ имеет следующие параметры (рис. 1(д)): внешняя оболочка диаметром $\varnothing \sim 4$ мм, внутренняя полость КТМ ($\varnothing = 3$ мм) содержит насыщенный $D-T$ пар плотностью $\rho_{SV} = 0.3$ мг/см³, между ними находится слой чистого $D-T$ топлива (толщина $W_{DT} = 190$ мкм, плотность $\rho_{DT} = 250$ мг/см³), окруженного аблятором, состоящим из полимерной пены (толщина пористого аблятора $W_{CH} = 261$ мкм, плотность пены $\rho_{CH} = 10$ мг/см³), заполненной твёрдым $D-T$ (плотность аблятора с топливом $\rho = 257.75$ мг/см³). Снаружи аблятор имеет пластиковое покрытие (например, полистирол, $W_{PS} = 1$ мкм, $\rho_{PS} = 1$ г/см³), на которое напылён тонкий отражающий слой из материала с высоким Z (например, золото, $W_{Au} = 0.03$ мкм, $\rho_{Au} = 19.3$ г/см³). Такой слой позволяет противостоять тепловой нагрузке и сохранять качество КТМ при ее доставке в центр камеры реактора ИТС. Температура КТМ в момент облучения лазером должна составлять $T_0 = 18.3$ К, чтобы обеспечить максимальный выход энергии из реакций синтеза. Именно при этой температуре достигается требуемая плотность насыщенного топливного пара ($\rho_{SV} = 0.3$ мг/см³) во внутренней полости КТМ.

В [5, 6] нами была разработана модель быстрого FST-формирования топливного слоя внутри движущейся КТМ (для диаметра КТМ ≤ 2 мм). Модель основана на решении краевой задачи Стефана [7], описывающей изменение фазового состояния вещества, при котором положение границы раздела фаз (газ, жидкость и твердое тело) также изменяется со временем. Отбор тепла реализуется, когда лишь только часть поверхности оболочки КТМ находится в тепловом контакте со стенкой КФ. Площадь пятна контакта составляет менее 1% от всей площади оболочки, но, как показали наши расчеты [5, 6], этого вполне достаточно, чтобы отобрать тепло и успеть сформировать криогенный слой за десятки секунд.

На данном этапе исследований модель была адаптирована для расчетов времени FST-формирования топливного слоя внутри КТМ реакторного класса (см. рис. 1(д)). В связи с этим сделаем несколько необходимых замечаний. Прежде всего, отметим, что при расчете времени охлаждения чистого слоя топлива учитывался тот факт, что теплопроводность изотопов водорода для любых фазовых состояний значительно больше теплопроводности оболочки из полистирола (см., например, [8]). Поэтому температурными градиентами в топливе можно пренебречь. Кроме того, КТМ при ее движении по спиральному КФ вращается, и топливо внутри оболочки перемешивается. Это означает, что при переходе к реакторной КТМ, содержащей пористый слой, мы должны убедиться, что эффективная теплопроводность системы “полимерная пена + топливо” уменьшается незначительно.

Эффективная теплопроводность может быть оценена из уравнения Клаузиуса–Моссотти (Clausius–Mossotti, [9]). Для двухфазной системы, в которой форма пор такова, что в среднем смесь может считаться изотропной, имеем:

$$k_{ef} = k_f \cdot \frac{1 - \mu\eta}{1 + \mu\eta}, \quad \mu = \frac{k_f - k_p}{k_f + k_p}.$$

Здесь k_f и k_p – теплопроводности топлива и полистирола, соответственно, η – концентрация полистирола. Для значений параметров $k_f/k_p = 0.1$ [8] и $\eta = 0.2$ (пористость слоя составляет 80%) получим $k_{ef}/k_f = 0.72$.

Оценка эффективной теплопроводности может быть проведена и более аккуратно с учётом возможной формы включений, т.е. структуры полимерной пены, характерные параметры которой указаны в работе [10]: поры открыты, имеют диаметр от 1 до 10 мкм и отношение толщины стенки поры к ее диаметру составляет 0.1. Тогда допустимо предположить, что поры имеют цилиндрическую форму и расположены хаотически. В этом случае можно использовать приближение Рэлея [7] для эффективной теплопроводности. При этом локальная компонента $k_{ef\parallel}$ в направлении оси цилиндра имеет вид:

$$\frac{k_{ef\parallel}}{k_f} = 1 + \eta \frac{k_p - k_f}{k_f},$$

а в перпендикулярном направлении определяется как:

$$\frac{k_{ef\perp}}{k_f} = 1 + \frac{2\eta}{\frac{k_p + k_f}{k_p - k_f} - \eta}.$$

Для произвольно ориентированных цилиндров усредненное значение определяется из выражения:

$$\frac{k_{ef}}{k_f} = 1 + \eta \left(\frac{1}{3} \frac{k_p - k_f}{k_f} + \frac{2}{3} \frac{2}{\frac{k_p + k_f}{k_p - k_f} - \psi} \right).$$

Рассматривая для цилиндрических пор те же значения параметров $k_f/k_p = 0.1$ и $\eta = 0.2$, что и для пор произвольной формы, получим, что эффективная теплопроводность будет равна $k_{ef}/k_f = 0.75$. Мы видим, что оба предположения для конфигурации пор (произвольная форма и цилиндрическая) дают близкие значения и показывают, что условие $k_{ef} \gg k_p$ по-прежнему выполняется. Поскольку для полимерной пены с $\rho = 10$ мг/см³ [4], пористость слоя составляет более 80%, то наша модель, в которой пренебрегается распределением температуры в топливном слое, тем более применима для рассматриваемой реакторной КТМ (рис. 1(д)).

Собственно формирование КТМ представляет собой изохорический процесс (рис. 1(г)), происходящий внутри полый замкнутой оболочки при ее охлаждении в спиральном КФ. Фазовые превращения при этом контролируются температурой КТМ и фазовой диаграммой топлива, которая полагается известной [8]. Состояние топлива в оболочке на P - V - T диаграмме представляется отрезком прямой (изохора формирования $\rho = 107.2 \text{ мг/см}^3 = \text{const}$, обозначенная на рис. 1(г) цифрами $1 \rightarrow 2 \rightarrow 3$), опускающейся сверху вниз (оболочка с топливом остывает). Переход “газ→жидкость” начинается, когда этот отрезок пересекает линию насыщения в точке T_S (точка 2 на рис. 1(г), температура начала разделения топлива на фазы). При дальнейшем охлаждении КТМ до температуры тройной точки топлива $T_{\text{ТР}}$ (для D_2 $T_{\text{ТР}} = 18.7 \text{ К}$, для D - T смеси $T_{\text{ТР}} = 19.7 \text{ К}$) происходит отвердевание криогенного слоя топлива внутри замкнутой оболочки, т.е. осуществляется переход “жидкость→твёрдая фаза”. Далее идёт охлаждение КТМ до $T_0 = 18.3 \text{ К}$. Считается, что внутри оболочки могут сосуществовать все три фазы топливного вещества, реальное же число фаз обусловлено характером процесса охлаждения и контролируется способом отвода тепла от поверхности КТМ через пятно контакта, т.е. временем спада температуры на внешней поверхности оболочки. Этот параметр свободен и зависит лишь от условий эксперимента, т.е. от того, как быстро остывает поверхность оболочки (для метода FST скорость охлаждения $q = 1 - 50 \text{ К/с}$ [1, 5, 6]). Результаты моделирования для реакторной КТМ (рис. 1(д)) с пористым слоем показали, что верхняя граница по времени формирования слоя, τ_{form} , определяется соотношениями (см. Таблицу 1): $\tau_{\text{form}} \leq 23 \text{ с}$ для D_2 топлива и $\tau_{\text{form}} \leq 30 \text{ с}$ для D - T топлива.

Т а б л и ц а 1

Время формирования КТМ с высоким энергетическим выходом.

Пояснения в тексте

D_2			D - T		
T_{in}	τ_{liquid}	τ_{form}	T_{in}	τ_{liquid}	τ_{form}
35.0 К	17.48 с	22.45 с	37.5 К	22.14 с	28.52 с
27.5 К	7.08 с	12.05 с	28.0 К	7.87 с	14.25 с

В таблице приняты следующие обозначения: T_{in} – начальная температура КТМ перед ее входом в КФ, причём $T_{\text{in}} \leq T_S$ (для D_2 $T_S = 36.5 \text{ К}$, для D - T смеси $T_S = 37.5 \text{ К}$), τ_{liquid} – время существования жидкой фазы топлива в процессе охлаждения КТМ, необходимое для его растекания по внутренней поверхности оболочки и достижения требуемой симметрии слоя, τ_{form} – полное время формирования криогенного слоя.

Таким образом, реализация высоких скоростей охлаждения, q , по методу FST ($q = 1 - 50$ К/с, $\tau_{\text{form}} \leq 30$ с) позволяет за короткое время сформировать $D-T$ слой внутри КТМ реакторного класса. Это отвечает требованию минимизации запасов радиоактивного трития в системе массового производства КТМ, т.е. минимизации всех временных и пространственных масштабов системы. Напомним, что время формирования КТМ с использованием традиционной технологии ($q \simeq 3 \cdot 10^{-5}$ К/с) составляет более 30 ч [2], что исключает её применение для создания реакторных технологий.

Заключение. Согласно программе МАГАТЭ “Пути достижения энергии с помощью ИТС” [11], требуется разработка технологии массового формирования бесподвесных КТМ реакторного класса, а также соответствующего МФ для их производства с высокой частотой (~ 1 млн в день). Проведенные расчёты свидетельствуют, что время формирования топливного слоя внутри реакторной КТМ по методу FST составляет $\tau_{\text{form}} \leq 30$ с. Полученное значение можно рассматривать в качестве реперной точки при построении модуля FST-формирования, работающего в непрерывном режиме. Практическим воплощением данной инновационной технологии станет начатая в ФИАН разработка прототипа фабрики КТМ для мощных лазерных установок и реактора ИТС.

Данная работа проведена при финансовой поддержке Международного Агентства по Атомной Энергии в рамках контракта № 20344 “Поточная FST-линия для массового производства мишеней для ИТС”, а также в рамках ГЗ ФИАН и по программе Президиума РАН.

Л И Т Е Р А Т У Р А

- [1] B. J. Kozioziemski, et al., Fusion Sci. Technol. **59**(1), 14 (2010).
- [2] I. V. Aleksandrova, E. R. Koresheva, High Power Laser Science and Engineering **5**(2), e11 (2017).
- [3] И. В. Александрова и др., Краткие сообщения по физике ФИАН **44**(12), 19 (2017) [Bulletin of the Lebedev Physics Institute **44**, 357 (2017)].
- [4] S. E. Bodner, et al., Phys. Plasmas **7**, 2298 (2000).
- [5] I. V. Aleksandrova, et al., Laser and Particle Beams **20**, 13 (2002).
- [6] I. V. Aleksandrova, et al., J. Phys. D: Appl. Phys. **37**, 1163 (2004).
- [7] А. Н. Тихонов, А. А. Самарский, *Уравнения математической физики* (М., Наука, 1977).

- [8] P. C. Souers, *Hydrogen properties for fusion energy* (Lawrence Livermore National Laboratory, University of California Press (Berkley, Los Angeles, London), 1986).
- [9] G. W. Milton, *Mechanics of composites* (Cambridge University Press, 2000).
- [10] ICF Handbook. Fabrication, characterization, and production of equipment and targets produced and manufactured by General Atomics and Schafer Corporation (2005); http://fusion.gat.com/icf/ICF_Catalog/catalog.pdf
- [11] Pathways to energy from inertial fusion: an integrated approach. Report of Coordinated Research Project 2006-2010. IAEA TECDOC No.1704, International Atomic Energy Agency, Vienna (2013); https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/TE_1704_web.pdf

Поступила в редакцию 1 апреля 2019 г.

После доработки 1 апреля 2019 г.

Принята к публикации 4 июля 2019 г.