

УДК 621.039.633

О ФОРМИРОВАНИИ КРИОГЕННЫХ ТОПЛИВНЫХ СЛОЕВ В УСЛОВИЯХ ВЫСОКОЧАСТОТНОГО МЕХАНИЧЕСКОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ

И. В. Александрова¹, А. А. Акунец¹, Е. Р. Корешева^{1,2},
Е. Л. Кошелев¹, Т. П. Тимашева¹

Представлены результаты серии экспериментов с использованием пьезовибрационного модуля формирования для получения криогенных мишеней с заданной структурой топливного слоя.

Ключевые слова: инерциальный термоядерный синтез (ИТС), криогенная мишень, высокодисперсная структура топливного слоя, криогенный пьезовибратор.

Формирование и доставка криогенных топливных мишеней с высокой частотой является непременным условием построения фабрики мишеней для обеспечения работы реактора на основе управляемого инерциального термоядерного синтеза (ИТС). На данный момент в исследованиях по ИТС крайне остро стоит проблема получения криогенного изотропного слоя топлива с заданной микроструктурой, позволяющей удовлетворить высоким критериям качества, а именно: отклонения от сферичности и концентричности должны составлять не более 1%, а локальные неоднородности на поверхности топливного слоя не должны превышать 1 мкм во всех модах. Поэтому в программе ИТС проведение широкого спектра исследований в области формирования топливного слоя с различной внутренней структурой, изучение отклика этой структуры на вариацию тепловых и механических нагрузок, включая отклик на прохождение ударной волны, является первостепенным при производстве мишеней для реактора. Результатом многолетней работы ФИАН явилось создание уникального структурно-чувствительного метода (т.н. free-standing target (FST) метод), который позволяет формировать оптимальную микроструктуру топлива применительно к задачам ИТС при условии реализации высоких скоростей охлаждения $q_{fst} = 1-50$ К/с [1]. Цель настоящей работы – изучить влияние различных внешних воздействий на структурную релаксацию высокодисперсного

¹ ФИАН, 119991 Россия, Москва, Ленинский пр-т, д. 53; e-mail: ivaaleks@gmail.com.

² Национальный исследовательский ядерный университет “МИФИ”, 115409, Россия, Москва, Каширское шоссе, д. 31; e-mail: elena.koresheva@gmail.com.

слоя топлива, чтобы сделать технологию FST не только более надежной и дешевой, но также и более эффективной для мишеней реакторного класса, когда толщина криогенного слоя становится значительной (200–300 мкм). Это является ключевым моментом при выборе реакторных технологий, а массовое производство мишеней приоритетно в национальных программах ведущих лабораторий мира.

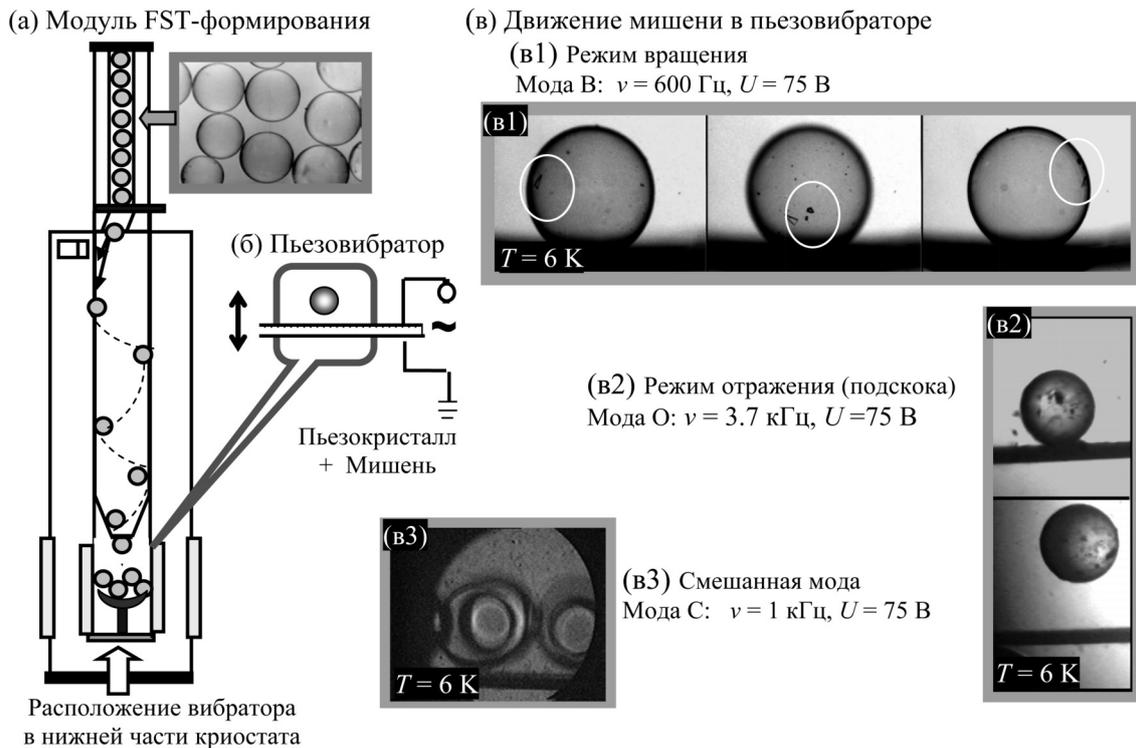


Рис. 1: Криогенный пьезовибратор для исследования процессов формирования топливного слоя внутри полых сферических оболочек (пояснения в тексте).

Для реализации поставленной задачи в ФИАН создана экспериментальная установка [1], которая позволяет варьировать ключевые параметры эксперимента (механические и тепловые нагрузки) в широких пределах, что дает возможность влиять на микроструктуру криогенного слоя и позволяет получать среду с различной степенью изотропности (рис. 1). Конструкция представляет собой вакуумную камеру с оптическими окнами, расположенную в нижней части криостата (рис. 1(а)). В камере располагается пьезовибратор (рис. 1(б)). Данное устройство работает на основе обратного пьезоэлектрического эффекта, что позволяет варьировать частоту вибраций пьезопластины в широких пределах. Движение мишени относительно поверхности пластины осуществляется при подаче на кристалл кварца тока заданной амплитуды и частоты (рис. 1(в)).

Вибрации приобретают наибольшую амплитуду, когда частота изменений электрического напряжения совпадает с частотой собственных колебаний пьезокристаллической пластины с закрепленными концами, расположенной внутри камеры. Эксперимент проводился следующим образом. Оболочка с топливом (изотопы водорода (H_2 или D_2) или их смесь (H_2+D_2)), лежащая на пластине из кварца, охлаждается вместе с пластиной до температуры немного выше тройной точки исследуемого изотопа ($T_{тр} = 13.9$ К для H_2 и $T_{тр} = 18.65$ К для D_2). Затем инициируется процесс отверждения (кристаллизации) топлива при понижении температуры ниже $T_{тр}$. Процесс инициируется либо в присутствии, либо в отсутствие вибраций пьезопластины. Частота вибраций ν может варьироваться в пределах от 0.3 Гц до 3 МГц. В зависимости от выбора частоты вибраций возможна генерация различных мод движения оболочки с топливом: (в1) – вращение (мода В), (в2) – отражение от поверхности кристалла или подскок оболочки (мода О), а также (в3) – смешанная мода (мода С). При реализации моды О величина относительной амплитуды подскока мишени $A = H/2R$ может меняться в широких пределах в зависимости от частоты управляющего импульса: от полутора до десяти диаметров мишени (см. табл. 1).

Т а б л и ц а 1

*Относительная амплитуда A высоты подъема мишени
в зависимости от частоты управляющего импульса*

Частота, Гц	800	1300	2400	3750
* $A = H/2R$	1.5	2	4	~ 10

* **Примечание:** H – высота максимального подъема мишени, R – внешний радиус мишени.

Подчеркнем, что как для случая пьезовибратора, так и при формировании по стандартному методу FST, темп охлаждения мишени контролируется только за счет механизма контактной теплопроводности. Температура пьезопластины может меняться в интервале от 80 до 4.2 К с точностью 0.5 К. В экспериментах использовались полые сферические оболочки из полистирола (СН-оболочки) диаметром от 1 до 2 мм, заполненные топливом при комнатной температуре (300 К) до давлений P_f от 100 до 450 атм.

По существу, речь идёт о получении новых функциональных структур топливного слоя, формируемых при различных внешних воздействиях и обладающих долгоживущими характеристиками качества. Как известно из литературы [2], наличие внешних

периодических воздействий на жидкую фазу вещества в процессе его кристаллизации позволяет регулировать дисперсность получаемой твердой фазы.

Внешнее воздействие приводит к тому, что, начиная с некоторого момента времени, определяемого амплитудой и частотой волны, рост зародышей кристаллической фазы прекращается. Дальнейшая их эволюция происходит двумя путями: либо часть зародышей полностью растворяется, либо выжившие зародыши попадают в режим динамического равновесия, при котором размеры их осциллируют около постоянного значения, а их концентрация во времени уже не меняется [2].

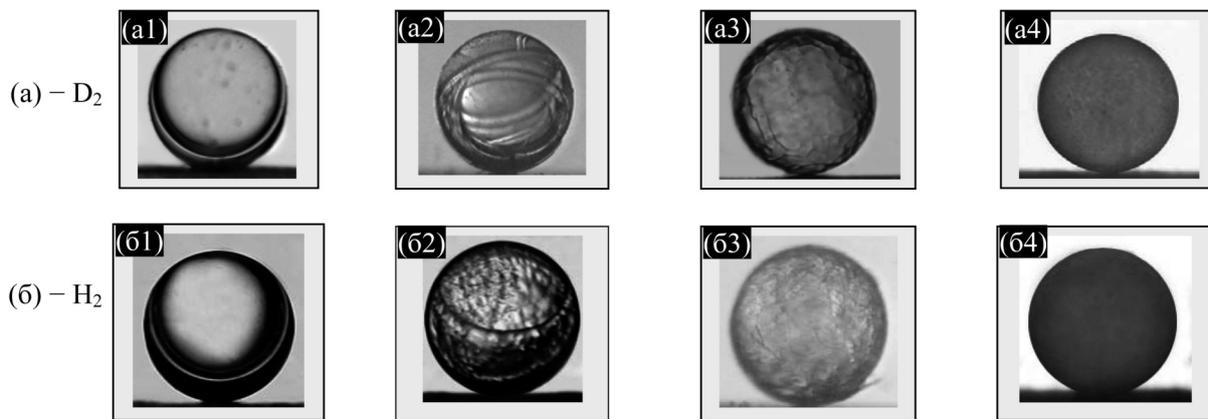


Рис. 2: Формирование твердого слоя топлива внутри СН-оболочек с помощью криогенного пьезовибратора: (а) D_2 ($2R \sim 1.35$ мм, $P_f = 350$ атм), (б) H_2 ($2R \sim 1.5$ мм, $P_f = 445$ атм) при охлаждении ниже тройной точки при разных частотах вибрации (пояснения в тексте).

На рис. 2 показаны сравнительные результаты по вымораживанию (кристаллизации) жидкой фазы дейтерия и водорода ниже тройной точки в условиях как неподвижной мишени (полая сферическая оболочка с жидким D_2 или H_2), так и при ее движении относительно пьезопластины в присутствии вибраций. Охлаждение ниже температуры тройной точки осуществлялось только через пятно контакта (в камере вакуум), скорость охлаждения мишени ниже, чем характерный диапазон скоростей для метода FST ($q_{fst} = 1-50$ К/с). Исходное состояние топлива внутри оболочки как для D_2 , так и для H_2 есть “Жидкость + Пар” (см. рис. 2, кадры а1 и б1).

На рис. 2(а) хорошо видно, что при постоянной скорости охлаждения $q = 0.1$ К/с, но при различном уровне вибраций, структуры получаемого твердого D_2 -слоя существенно различаются: (а2) – отсутствие вибраций ($A = 0$; $\nu = 0$) \rightarrow образуется крупнозернистый кристаллический слой, (а3) – слабые вибрации ($A = H/2R < 4$;

$2.25 \text{ кГц} < \nu < 3.5 \text{ кГц}$) \rightarrow характерная кристаллическая структура начинает как бы “расплываться” за счет появления более высокодисперсных кластеров, (а4) – сильные вибрации ($A = H/2R \sim 10$; $\nu = 3.75 \text{ кГц}$) \rightarrow формируется твердая дисперсная фаза дейтерия, которая достаточно равномерно покрывает внутреннюю поверхность оболочки.

На рис. 2(б) представлены результаты формирования твердого слоя топлива внутри СН-оболочек бóльшего диаметра и заполненных водородом до бóльшего давления, чем это имело место на рис. 2(а). Кроме того, серия экспериментов на рис. 2(б) реализована при бóльшем уровне вибраций и при различных скоростях охлаждения: $q = 0.1 \text{ К/с}$ (б2 и б3) и $q = 0.5 \text{ К/с}$ (б4). Хорошо видно, что при отсутствии вибраций получается крупнозернистая структура твердого H_2 -слоя (б2). При той же скорости охлаждения $q = 0.1 \text{ К/с}$, но в присутствии вибраций ($\nu \sim 2.4 \text{ кГц}$) структура слоя уже более сглаженная (б3). При одновременном повышении уровня вибраций ($\nu \sim 10 \text{ кГц}$) и скорости охлаждения до $q = 0.5 \text{ К/с}$ формируется высокодисперсная структура твердого водородного топлива (б4).

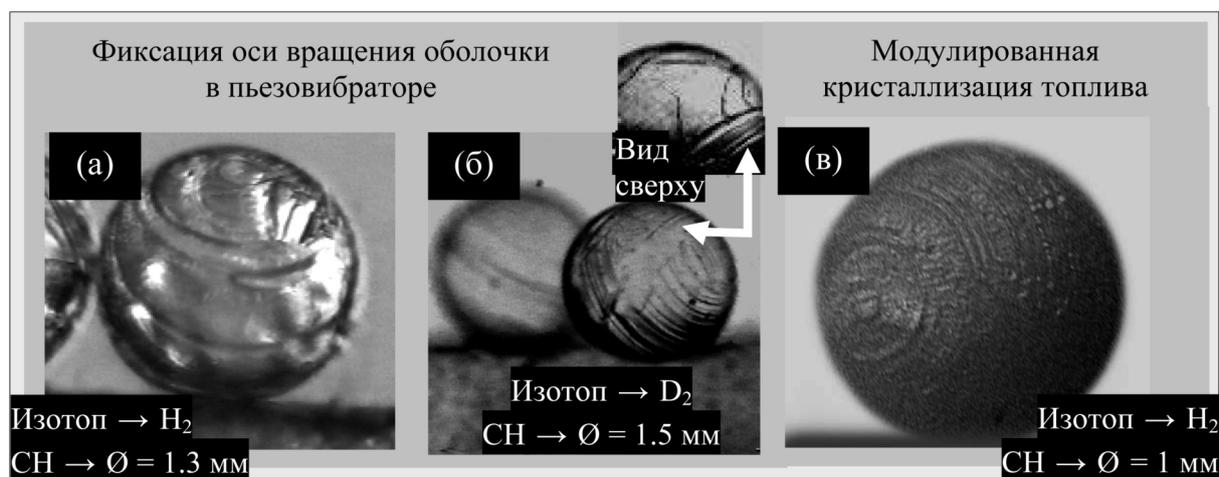


Рис. 3: Влияние поведения оси вращения оболочки на процесс симметризации слоя топлива (пояснения в тексте).

Отметим также, что конфигурация дисперсного слоя существенно зависит от режима вращения оболочки (постоянная или беспорядочная ось вращения), причем однородное распределение диспергированного слоя достигается только при беспорядочном вращении оболочки, т.е. при условии непостоянства оси вращения. При фиксированной оси наблюдается модулированная кристаллизация, т.е. образуется специфическое

периодическое распределение дисперсных твердых частиц на внутренней поверхности оболочки. Другими словами, если ось вращения постоянна, то можно рассчитывать на достижение лишь осевой симметрии слоя (рис. 3).

Заключение. Применение вибраций при одновременной реализации относительно высоких скоростей охлаждения способствует получению топливного слоя в высокодисперсном состоянии, что открывает перспективы для формирования качественных криогенных мишеней реакторного класса. Именно в высокодисперсном состоянии свободная граница топлива имеет минимальный уровень шероховатости, что является одним из важнейших требований к качеству криогенной мишени. Кроме того, высокодисперсный слой является изотропным, а это позволяет свести к минимуму опасность появления локальных неоднородностей на его поверхности и роста разнотолщинности в процессе доставки криогенной мишени в фокус реактора ИТС.

Финансовая поддержка работы осуществлялась в рамках контракта РФФИ № 15-02-02497, а также в рамках Государственного контракта по организации научной деятельности (тема № 27).

Л И Т Е Р А Т У Р А

- [1] И. В. Александрова, Е. Р. Корешева, О. Н. Крохин, И. Е. Осипов, ВАНТ. Сер. Термоядерный синтез **38**, вып. 1, 57 (2015).
- [2] В. Н. Нишанов, А. А. Собянин, Э. Н. Цой, Краткие сообщения по физике ФИАН, № 1, 8 (1987).

Поступила в редакцию 1 марта 2016 г.