

УДК 621.039.633

## ФОРМИРОВАНИЕ УЛЬТРАДИСПЕРСНОГО ВОДОРОДНОГО СЛОЯ ПРИ ВНЕШНЕМ ВИБРАЦИОННОМ ВОЗДЕЙСТВИИ НА КРИОГЕННУЮ МИШЕНЬ

*И.В. Александрова<sup>1</sup>, А.А. Акунец<sup>1</sup>, Е.Р. Корешева<sup>1,2</sup>, Е.Л. Кошелев<sup>1</sup>, Т.П. Тимашева<sup>1</sup>*

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

<sup>2</sup>Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Москва, Россия

Необходимым элементом современных исследований в области ИТС является производство криогенных мишеней для установок мегаджоульного класса. Топливный слой в мишени должен находиться в ультрадисперсном состоянии, чтобы минимизировать риск её разрушения под действием внешних тепловых и механических перегрузок, возникающих при доставке мишени в лазерный фокус установки ИТС. Это обусловлено тем, что твёрдые изотопы водорода состоят из анизотропных молекулярных кристаллов. Такая структура топлива может привести к потере качества слоя как в процессе ускорения мишени за счёт сферически асимметричной сублимации твёрдого топлива, а значит, роста шероховатости и разнотолщинности слоя, так и на этапе её сжатия при прохождении по слою сферической ударной волны за счёт возникающей зависимости скорости сферической волны от ориентации зёрен в кристаллическом анизотропном слое. В последние два десятилетия в ФИАН интенсивно развиваются структурно-чувствительные методы, позволяющие формировать требуемую микроструктуру топлива применительно к задачам ИТС. Для оптимизации технологии получения ультрадисперсных слоёв из твёрдых изотопов водорода в ФИАН разработано специальное устройство «криогенный пьезовибратор» для исследования процессов структурирования топливного слоя внутри полых сферических оболочек при вариации механических и тепловых нагрузок на мишень. Цель исследований — получить разупорядоченные структуры топлива с большой плотностью дефектов, т.е. изотропную среду с требуемыми характеристиками качества. В настоящей работе на основе математического моделирования определены оптимальные условия для формирования изотропного ультрадисперсного твёрдого водородного слоя при внешнем вибрационном воздействии на криогенную мишень.

**Ключевые слова:** инерциальный термоядерный синтез, криогенная мишень, ультрадисперсный топливный слой, пьезо-вибратор.

## ULTRA-FINE HYDROGEN LAYER FABRICATION IN THE CONDITIONS OF OUT-VIBRATING INFLUENCE ON A CRYOGENIC TARGET

*I.V. Aleksandrova<sup>1</sup>, A.A. Akunets<sup>1</sup>, E.R. Koresheva<sup>1,2</sup>, E.L. Koshelev<sup>1</sup>, T.P. Timasheva<sup>1</sup>*

<sup>1</sup>P.N. Lebedev Physical Institute of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

<sup>2</sup>National Research Nuclear University «MEPhI», Moscow, Russia

A considerable attention has recently been focused on the issue of large target fabrication for inertial confinement fusion (ICF) research on MJ-class laser facilities. The targets require a condensed uniform layer of hydrogen fuel on the inside of a spherical shell. The fusion fuel inside the targets must have such a structure, which supports the fuel layer survivability under target injection and transport through the reactor chamber. Over the last two decades, the Lebedev Physical Institute (LPI), has been devising the structure-sensitive methods of forming high-quality hydrogen fuel with an isotropic structure (ultra-fine type of solid layers) to meet the requirements of implosion physics. A considerable anisotropy of hexagonal close-packed (HCP) phases of H<sub>2</sub> and D<sub>2</sub> structure (single crystal or coarse-grained crystalline layers) results in the layer degrading due to roughening of the layer surface before the target reaches the chamber center, or can result in the spherical-shock velocity dependence on the grain orientation. On the contrary, the ultra-fine solid layers have enhanced mechanical strength and thermal stability which is of critical importance for target fabrication, acceleration and injection. To meet the goal of ultra-fine solid layers formation, the LPI has constructed a piezo-vibration module, in which the couple «membrane & target» is driven by an input signal generated due to inverse piezoelectric effect during fuel cooling via the heat conductivity within vibrating targets. It allows one to modify the key experimental parameters (mechanical and thermal) for influencing the fuel microstructure and intensifying the creation of ultimate disordered structures with a large defect density, i.e., isotropic medium. In this report, the modeling results of the processes of cryogenic layer fabrication in the conditions of high-frequency mechanical influence is presented. The investigation is carried out to gain insight into the relation between the microstructure and bulk properties of the fusion fuel, and to fabricate this fuel with a given microstructure within ICF targets.

**Key words:** inertial confinement fusion, cryogenic target, ultra-fine structure of fuel layer, piezo-vibrator.

DOI: 10.21517/0202-3822-2017-40-3-49-62

### ВВЕДЕНИЕ

Одной из важнейших задач текущего этапа в развитии управляемого инерциального термоядерного синтеза (ИТС) является создание научной и технологической базы для получения криогенного слоя водородного топлива с заданной микроструктурой, позволяющей удовлетворить высоким критериям качества, а именно: отклонение  $\varepsilon_1$  от сферичности и концентричности должно составлять не более 1%, локальная неоднородность  $\varepsilon_2$  на поверхности топливного слоя не должна превышать

1 мкм во всех модах. Основные проблемы здесь связаны с разработкой технологий массового производства криогенных топливных мишеней (КТМ) и необходимостью их инъекции в камеру реактора с частотой 1—10 Гц. Поэтому в программе ИТС проведение широкого спектра исследований при изучении вопросов о влиянии структуры твёрдого топлива на качество криогенного слоя, а также сохранении этого качества вплоть до момента облучения КТМ мощным лазером, является приоритетным в национальных программах ведущих лабораторий мира [1]. Твёрдый водородный слой топлива должен находиться в ультрадисперсном состоянии, которое характеризуется малой длиной упорядоченности, т.е. малым размером зерна  $d$ : субмикронный диапазон ( $d = 0,1—0,3$  мкм) и нанокристаллический (обычно  $d \leq 100$  нм). Такой слой обладает комплексом новых свойств: изотропность, термостойкость и высокая прочность [1, 2]. Использование такого слоя позволяет минимизировать риск разрушения КТМ под действием внешних тепловых и механических перегрузок, возникающих при её доставке в реактор ИТС. Формирование качественных слоёв водородного топлива возможно прежде всего за счёт реализации экстремально высоких скоростей охлаждения (1—50 К/с), которые достигаются с помощью разработанного в Физическом институте им. П.Н. Лебедева Российской академии наук (ФИАН) метода FST (аббревиатура от free-standing targets — формирование криогенного слоя внутри движущихся бесподвесных оболочек) [1—10]. При этом высокие скорости охлаждения сочетались с применением высокоплавких добавок к топливу. Это позволило быстро ( $<15$  с) сформировать устойчивый изотропный твёрдый слой в ультрадисперсном состоянии [3, 6—9]. По существу, речь идёт о получении новых функциональных структур топлива, обладающих долгоживущими характеристиками качества. Это имеет первостепенное значение для практической реализации требований по физике сжатия мишеней, а также сохранения качества топливного слоя в экспериментах по ИТС [8—10]. Другой подход, развиваемый авторами [1, 6, 11], основан на структурировании водородного топлива при использовании нового модуля формирования — «криогенный пьезовибратор», или КПВ, который обеспечивает внешнее вибрационное воздействие на КТМ при реализации относительно высоких скоростей охлаждения (рис. 1—5).

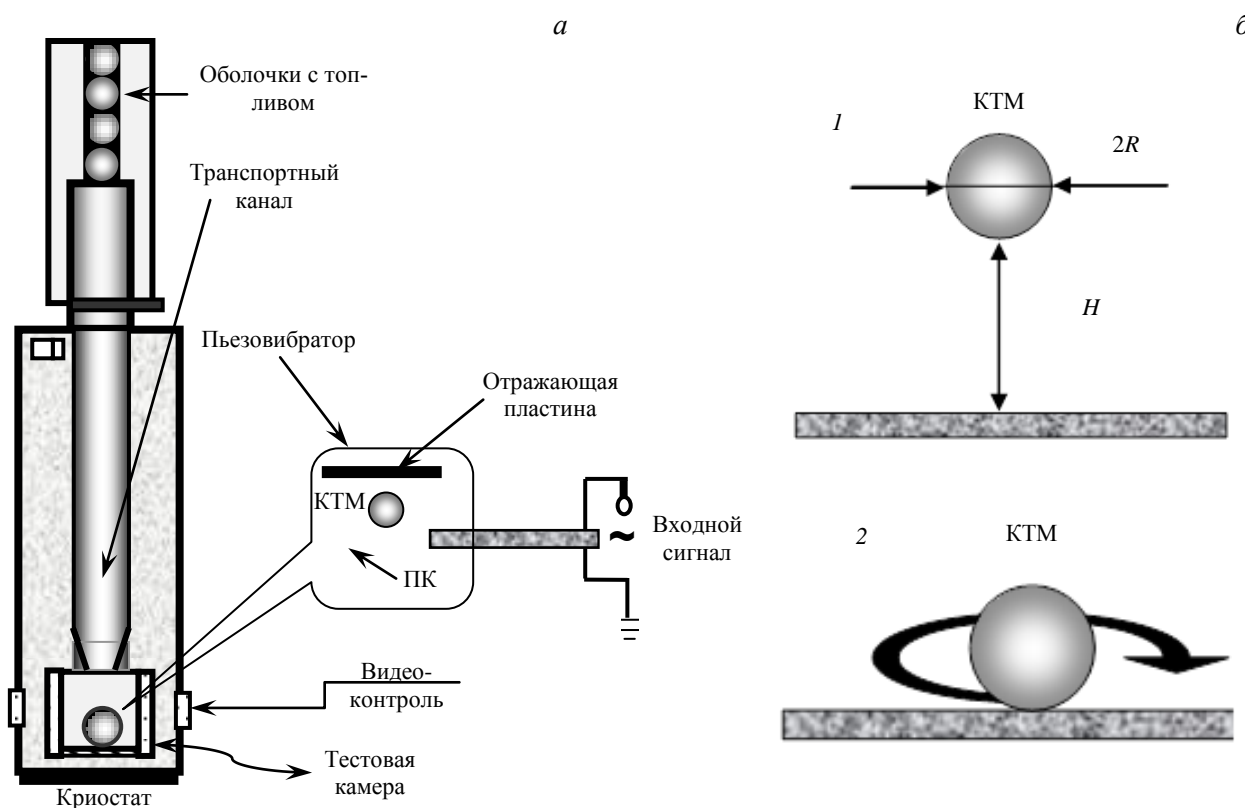


Рис. 1. Функциональная схема МФ-КПВ, предназначенного для исследования процессов структурирования топливного слоя внутри полых сферических оболочек: *а* — размещение в криостате системы КТМ + ПК; *б* — основные генерируемые моды движения КТМ в МФ-КПВ: 1 — отражение КТМ от поверхности ПК (мода *O*); 2 — вращение КТМ на поверхности ПК (мода *B*)

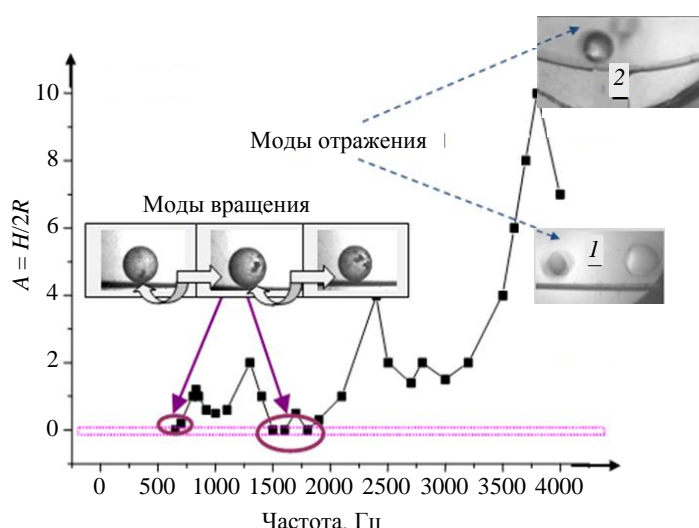


Рис. 2. Относительная амплитуда  $A$  высоты подъёма КТМ в зависимости от частоты управляющего импульса ( $H$  — высота максимального подъема,  $R$  — внешний радиус оболочки). Параметры мод: мода  $B$  ( $\nu = 600$  Гц,  $U = 75$  В,  $T = 6$  К), мода  $O$  ( $\nu = 3,7$  кГц,  $U = 75$  В,  $T = 4,2$  К), подложка: 1 — плоская; 2 — вогнутая

Моды отражения

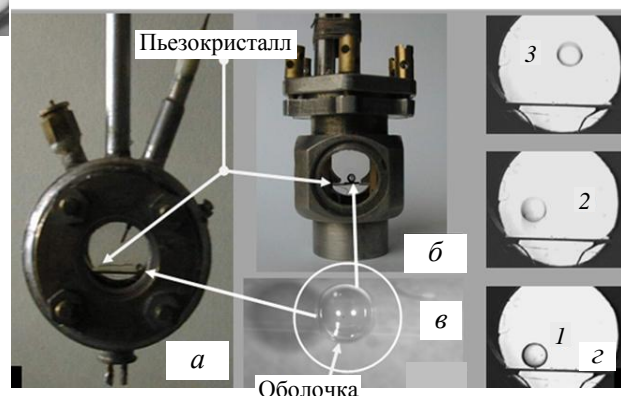


Рис. 3. Общий вид оптической ТК и рабочих элементов МФ-КПВ ( $a$ ,  $b$ ,  $в$ ), а также видеокдры ( $г$ ) — результаты записи эксперимента при работе МФ-КПВ с одной вибрирующей пластиной ( $\nu = 1,2$  кГц,  $U = 1,5$  В) при температуре  $T = 20$  К

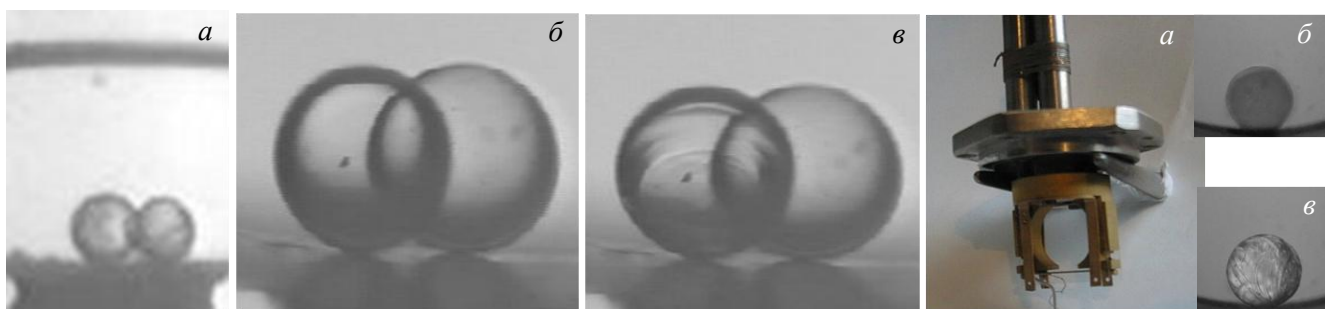


Рис. 4. МФ-КПВ с верхней отражающей поверхностью ( $a$ ); кадр  $б$  — полимерные оболочки до начала эксперимента;  $в$  — при подаче входного управляющего сигнала

Рис. 5. Крепление ПК в рамке держателя МФ-КПВ ( $a$ ). Результаты экспериментов: при отсутствии вибраций ( $\nu = 0$ ) образуется крупнокристаллическая структура водорода ( $б$ ); при той же скорости охлаждения  $q = 0,5$  К/с, но в присутствии вибраций ( $\nu \sim 10$  кГц) формируется уже высокодисперсная структура твёрдого водородного слоя ( $в$ )

В настоящей работе выполнено математическое моделирование, по результатам которого проведена оптимизация конструкции пьезовибратора, а также условий получения изотропного ультрадисперсного слоя топлива внутри КТМ реакторного класса.

### МОДЕЛИРОВАНИЕ ОСНОВНЫХ ПРОЦЕССОВ ПРИ ОХЛАЖДЕНИИ ОБОЛОЧКИ С ТОПЛИВОМ В КРИОГЕННОМ ПЬЕЗОВИБРАТОРЕ С УЧЁТОМ МЕХАНИЧЕСКИХ И ТЕПЛОВЫХ ВОЗДЕЙСТВИЙ НА МИШЕНЬ

Модуль формирования «криогенный пьезовибратор» (МФ-КПВ) размещается внутри оптической тестовой камеры (ТК), расположенной в нижней части криостата. Внутри МФ-КПВ размещена пьезокристаллическая пластина с закреплёнными концами (см. рис. 1,  $a$ ). Движение КТМ относительно поверхности пьезокристалла (ПК) осуществляется за счёт обратного пьезоэлектрического эффекта при подаче на кристалл тока заданной амплитуды ( $U$ ) и частоты ( $\nu$ ). В зависимости от выбора частоты вибраций возможна генерация различных мод движения КТМ. Основные моды: вращение (мода  $B$ , см. рис. 1,  $б$ ) и отражение от поверхности кристалла (мода  $O$ , см. рис. 1,  $a$ ), смешанная мода (мода  $C$ ) [11]. Порядок проведения экспериментов: оболочка с топливом (изотопы водорода ( $H_2$  или  $D_2$ ) или их смесь ( $H_2 + D_2$ )) предварительно охлаждалась до температуры немного выше температуры тройной точки изотопа ( $T_{тр} = 13,9$  К

для  $H_2$  и  $T_{тр} = 18,65$  К для  $D_2$ ). Затем инициировался процесс отверждения (кристаллизации) топлива при охлаждении оболочки ниже  $T_{тр}$  в присутствии вибраций. Частота вибраций может варьироваться в пределах от 0,3 Гц до 3 МГц (см. рис. 2), скорость охлаждения оболочки варьировалась в пределах от  $10^{-5}$  К/с (традиционные зарубежные технологии [1, 2, 12]) до 1 К/с (нижняя граница для метода FST (ФИАН, Россия) [1—5]). В экспериментах использовались полые сферические оболочки из полистирола (производство ФИАН) диаметром от 1 до 2 мм, заполненные топливом до давления 100—450 атм. при 300 К. Температура подложки  $T$  выбиралась в зависимости от условий эксперимента. Функционально МФ-КПВ может работать либо с одной (см. рис. 3), либо с двумя пластинами (см. рис. 4). Типичные результаты экспериментов представлены на рис. 5, в которых использовалась одна пластина — ПК (см. рис. 5, а), а также полимерная оболочка  $\varnothing = 1,5$  мм, заполненная водородом до 400 атм. при комнатной температуре. Хорошо видно, что в отсутствие вибраций ( $v = 0$ ) образуется крупнокристаллическая структура водорода (см. рис. 5, б). При той же скорости охлаждения  $q = 0,5$  К/с, но в присутствии вибраций ( $v \sim 10$  кГц) формируется уже высокодисперсная структура твёрдого водородного слоя (см. рис. 5, в) (детали см. в [1, 11]).

Основная задача настоящего исследования — оптимизировать условия формирования ультрадисперсного слоя внутри КТМ за счёт перехода в МФ-КПВ от одной вибрирующей пластины к двум пластинам, причём вибрирующей может быть только одна из них, другая является отражающей, т.е. ограничивающей высоту подскока КТМ в МФ-КПВ. На первой стадии исследований в качестве реперной КТМ будем рассматривать оболочку с параметрами: диаметр  $\varnothing = 2R = 0,983$  мм, толщина стенки  $\Delta R = 15$  мкм, толщина криогенного слоя  $H_2$   $W = 88$  мкм. При тестировании модели это позволит опираться на те экспериментальные результаты, которые были получены в ФИАН ранее при формировании мишеней по методу FST.

**Условия эксперимента и постановка задачи.** Начнём с рассмотрения вопросов, связанных с оценкой теплообмена при однократном ударе теплой КТМ о холодную подложку ПК. Этот вопрос актуален как для одной, так и для двух пластин. Прежде чем приступить к анализу указанного процесса, предварительно сделаем следующие необходимые замечания.

1. Удар нормальный, без вращения, т.е. при движении мишени рассматривается случай генерации только моды  $O$ .

2. Удар квазистатический, т.е. применима теория Герца об упругом ударе [13]. Это подтверждается экспериментами стабильной работы МФ-КПВ при генерации различных мод движения. Исходя из теории Герца, легко оценить время соударения:

$$t_c = 2,943 \left( \frac{15m}{16E} \right)^{2/5} (RV)^{-1/5}, \quad (1)$$

где  $m$  — масса мишени;  $V$  — скорость в момент соударения;  $E$  — модуль Юнга для материала оболочки.

Изменение радиуса пятна контакта со временем описывается формулой

$$r(t) = r_{\max} \left[ \sin \pi \left( \frac{t}{2t_3} \right) \right]^{1/2}, \quad 0 \leq t \leq t_3; \quad (2)$$

$$r(t) = r_{\max} \left[ \cos \pi \left( \frac{t-t_3}{2t_0} \right) \right]^{1/2}, \quad t_3 \leq t \leq t_3 + t_0. \quad (3)$$

Величины  $t_3$  и  $t_0$  суть отрезки времени, относящиеся соответственно к периоду роста (зацепление соударяющихся объектов) и периоду спада пятна контакта (период отдачи). Тогда площадь контакта будет равна

$$S_c(t) = \pi r_{\max}^2 \left[ \sin \pi \left( \frac{t}{2t_3} \right) \right], \quad 0 \leq t \leq t_3; \quad (4)$$

$$S_c(t) = \pi r_{\max}^2 \left[ \cos \pi \left( \frac{t-t_3}{2t_0} \right) \right], \quad t_3 \leq t \leq t_3 + t_0. \quad (5)$$

3. Во время контакта тепловой поток нормален к поверхности пятна контакта.

4. Внешняя поверхность КТМ (т.е. её оболочка) не имеет шероховатостей, и во время соударения между подложкой (ПК) и КТМ реализуется идеальный тепловой контакт. Это предположение вполне обосновано, так как требуемая точность при производстве оболочек для КТМ очень высока (шероховатость поверхности оболочки на уровне  $\sim 20$  нм [1, 2, 12]).

5. Для минимизации времени вымораживания не имеет смысла рассматривать начальные температуры КТМ существенно выше тройной точки. Другими словами, исходное состояние КТМ при формировании криогенного слоя — это полимерная оболочка, содержащая жидкое топливо вблизи температуры тройной точки, т.е. слегка выше  $T_{тр}$ . Естественно, что сама оболочка имеет ту же температуру, что и содержащееся в ней топливо. Температура подложки, т.е. ПК в МФ-КПВ равна 4,2 К.

6. Величину относительной амплитуды  $A = H/2R$  будем считать параметром задачи, так как экспериментально показано, что указанная величина может меняться в широких пределах в зависимости от частоты управляющего импульса: от полутора до десяти диаметров внешней оболочки КТМ (см. рис. 2).

Сделаем ещё одно важное замечание. Основная цель моделирования процесса охлаждения КТМ в МФ-КПВ — это оценка времени формирования именно равнотолщинного криогенного слоя, чтобы иметь возможность сравнить его с методом FST. Какой же механизм симметризации слоя можно предложить в этом случае? Как было показано в [4], в неподвижной оболочке нельзя выморозить жидкое топливо с требуемой симметрией. Однако использование движущейся оболочки позволяет избежать трудностей, присущих формированию топливного льда в неподвижной КТМ. Другими словами, ранее поставленный вопрос о механизме симметризации слоя сводится к вопросу о характере движения и охлаждения КТМ в МФ-КПВ, существенной особенностью которого является прерывность во времени теплового контакта КТМ с подложкой.

В этом процессе можно выделить две существенно различные фазы:

- фаза движения мишени в свободном полёте между последовательными соударениями;
- фаза непосредственного соударения мишени с подложкой.

Очевидно, в ходе такого движения обмен теплом происходит двумя способами:

- за счёт излучения;
- за счёт контактной теплопроводности в моменты удара мишени о подложку.

Конвективный же теплоперенос отсутствует из-за проведения эксперимента в вакуумной камере.

Используя созданный ранее численный код [4], мы провели расчёты, показывающие, что для охлаждения реперной КТМ за счёт излучения от температуры 14 К до вымораживания топливного слоя требуется около  $1,25 \cdot 10^5$  с, или  $\sim 35$  ч. Этот результат означает, что при решении задачи мы вполне можем ограничиться лишь механизмом теплопередачи при соударении КТМ с подложкой из ПК, т.е. за счёт только контактной теплопроводности. Тогда охлаждение топлива в КТМ и образование твёрдого слоя льда можно представить себе как поочерёдное возникновение ледяных пятнышек в случайно разбросанных точках (эффект «конфетти»). Обеспечение именно такого характера движения является необходимым условием формирования КТМ, поскольку перед нами стоит задача не просто оценить время, за которое можно охладить топливо до образования водородного льда, но и получить равнотолщинный криогенный слой на внутренней поверхности оболочки. Поэтому нас будет интересовать следующий вопрос: какое общее количество ударов необходимо, чтобы обеспечить требуемую симметрию? Пусть  $N$  — это число ударов мишени о подложку на протяжении времени существования жидкой фазы топлива. Так как жидкое топливо находится при температуре тройной точки, то образовавшийся лёд не тает, и  $N$  есть также и количество ледяных пятнышек-конфетти. Тогда в силу центральной предельной теоремы относительное отклонение числа этих пятнышек от среднего уровня есть  $1/N^{1/2}$ . В итоге имеем оценку степени отклонения топливного слоя от сферичности ( $NU$  — общепринятое обозначение при сокращении от англ. non-uniformity) в процентах:

$$\varepsilon \sim \frac{100}{\sqrt{N}}. \quad (6)$$

Таким образом, из этой оценки следует, что для обеспечения  $NU$  на уровне 1% за счёт механизма «конфетти» нужно иметь достаточно большое число ударов —  $N \sim 10^4$  и больше.

Теперь в рамках сделанных предположений перейдём к вопросу оценки количества тепла  $Q_{out}$ , передаваемого теплой КТМ при однократном ударе о холодную подложку (ПК). Согласно закону Фурье количество теплоты  $Q_{out}$ , проходящей через элемент поверхности  $dS$  за промежуток времени  $dt$ , пропорционально градиенту температуры

$$\frac{dT}{dr} = \frac{T_1 - T_2}{L}; \tag{7}$$

$$Q_{out} = k(T) dS \frac{dT}{dr} dt. \tag{8}$$

В правой части уравнения буквенным обозначениям соответствуют величины, характеризующие процесс теплопереноса в данном конкретном случае соударения теплой КТМ о холодную подложку, а именно:  $k$  — теплопроводность материала стенки КТМ (оболочки);  $dS$  — площадь пятна контакта между КТМ и подложкой;  $T_1$  — температура КТМ;  $T_2$  — температура подложки;  $L$  — характерное расстояние, на которое распространится тепловая волна по материалу оболочки за время соударения. Учитывая, что величины  $T_1$  и  $T_2$  известны, для определения количества тепла, передающегося за одно соударение, требуется знать максимальную площадь пятна контакта (рис. 6)  $S_c^{max} = \pi r_{max}^2$  и расстояние  $L$ .

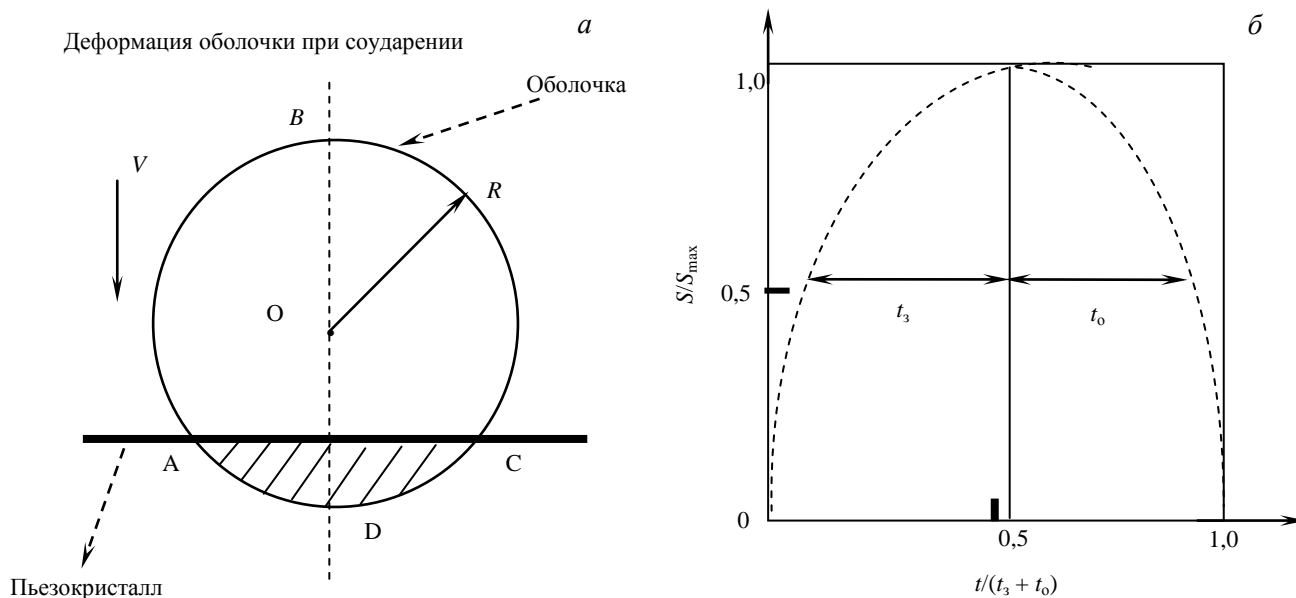


Рис. 6. Образование (а) и временная динамика (б) пятна контакта при соударении о пьезокристалл

Оценка площади пятна как функция параметров КТМ может быть сделана из следующих энергетических соображений: вся работа при ударе, связанная с перемещением центра тяжести оболочки-сферы, содержащей топливо, за вычетом работы противодействующих сил давления, идёт на деформацию оболочки. Предполагается, что оболочка остаётся сферой постоянного радиуса за исключением сегмента её нижней части, который, деформируясь, превращается в круговое пятно того же радиуса, но меньшей площади (см. рис. 6, а). Учитывая, что энергия упругой деформации  $W \sim E\Delta V$  соответствует работе, связанной с перемещением центра тяжести оболочки, можно получить интересующую нас оценку для площади пятна контакта. Для удобства оценок введём следующие параметры:

$$\chi = \frac{\pi r_{max}^2}{4\pi R^2} = \frac{S_c^{max}}{4\pi R^2} \text{ и } \delta = \frac{\Delta R}{R}. \tag{9}$$

Тогда изменение объёма оболочки в процессе удара можно записать следующим образом (для типичных оболочек  $\Delta R/R \ll 1$ ):  $\Delta V = \delta\pi R^3 \left( \frac{1}{12} \frac{r^4}{R^4} + \dots \right)$ , так что  $\Delta W \sim E\Delta V \sim \chi^2 \frac{4}{3} \pi R^3 E \delta$ .

Поскольку деформация оболочки КТМ происходит при её столкновении с пластинкой ПК (КТМ налетает на ПК со скоростью  $V$ ), то кинетическая энергия КТМ расходуется на упругую деформа-

цию оболочки и образование пятна контакта. Приравнивая  $W_{\text{kin}}$  и  $\Delta W$ , находим параметр  $\chi$  в формуле (9):

$$\chi \sim \sqrt{\frac{3mV^2}{8\pi R^3 E\delta}}. \quad (10)$$

Тогда максимальная площадь пятна контакта составит величину

$$S_c^{\text{max}} = \sqrt{\frac{6\pi mV^2}{E\Delta R}}. \quad (11)$$

Характерная кривая, описывающая изменение во времени площади пятна контакта, представлена на рис. 6, б. Среднюю площадь пятна за время соударения примем равной половине максимальной. Поскольку в экспериментах  $S_{\text{max}}$  достаточно малая величина ( $4\text{--}13$ ) $10^{-6}$  см<sup>2</sup>, то элемент поверхности  $dS$  запишем в виде  $dS = 0,5S_{\text{max}}$ .

Теперь нам осталось оценить линейные размеры той части оболочки, которая эффективно участвует в теплообмене с подложкой. Отметим, что за время соударения разные точки оболочки охладятся в разной степени. Будем считать, что расстояние  $L$ , на которое распространилась тепловая волна, есть расстояние от стока (центр пятна контакта) до точки, в которой температура оболочки упадёт в  $e$  раз. Оценим величину  $L$ .

Как известно, скорость выравнивания температуры в неравномерно нагретом теле характеризуется коэффициентом температуропроводности  $b = k/C\rho$ . Сам же теплообмен характеризуется уравнением теплопроводности

$$\frac{dT}{dt} = b \frac{d^2T}{dr^2}. \quad (12)$$

Заменим дифференциалы по времени и пространству малыми величинами  $t_c$  и  $L$  соответственно. Используя эту формулу, мы можем оценить, на какое расстояние распространилась температурная волна за время контакта, или, другими словами, оценить линейные размеры той области оболочки, которая участвует в теплообмене с подложкой за время соударения:

$$L \sim \sqrt{\frac{t_c k}{\rho C}}.$$

Используя соотношение  $dS = 0,5S_{\text{max}}$ , получим следующую формулу для определения количества тепла, передающегося за одно соударение:

$$Q_{\text{out}} = 0,5\sqrt{\rho C k} S_{\text{max}} (T_1 - T_2) t_c^{1/2}. \quad (13)$$

Подставляя найденное нами ранее значение (11) для максимальной площади пятна контакта в выражение (13), запишем величину  $Q_{\text{out}}$  через параметры КТМ:

$$Q_{\text{out}} = 2,2(T_1 - T_2)(\pi m/E\Delta R)^{1/2} V t_c^{1/2}, \quad \text{где } \beta = (\rho C k)^{1/2}. \quad (14)$$

Это соотношение позволяет оценить время формирования равнотолщинного криогенного слоя с учётом того, что существенной особенностью движения и охлаждения КТМ в МФ-КПВ является прерывность во времени её теплового контакта с холодной подложкой из ПК.

**Результаты моделирования и анализ полученных данных.** Для удобства последующего сравнения полученных результатов с уже имеющимися экспериментальными и расчётными данными пусть исследуемая КТМ будет иметь те же параметры, что и реперная, сформированная методом FST ( $\varnothing = 0,983 \sim 1$  мм,  $\Delta R = 15$  мкм,  $W = 88$  мкм (H<sub>2</sub>)).

Цикл формирования по методу FST реализуется следующим образом [1—5]. Находящиеся в контейнере оболочки с жидким (или газообразным) топливом инжектируются в канал формирования (КФ), который представляет собой специальную вставку в криостат в виде вакуумированной трубки с охлаждаемыми стенками (транспортный канал на рис. 1, а). При движении оболочки по КФ в результате её контакта с холодной стенкой последнего происходит её охлаждение и вымораживание топлива на внут-

ренней стенке полой сферической оболочки за счёт процесса контактной теплопроводности. Согласно методу FST две стадии будут важными при формировании криогенного слоя (процедура расчёта детально описана в работе [4]):

- первая стадия: охлаждение жидкой фазы топлива от начальной температуры  $T_{in}$  до температуры тройной точки  $T_{тр}$  (время  $\tau_{solid}^{FST}$ );
- вторая стадия: вымораживание слоя при температуре  $T = T_{тр}$  (время  $\tau_{solid}^{FST}$ );
- полное время формирования составит величину  $\tau_{form}^{FST} = \tau_{liquid}^{FST} + \tau_{solid}^{FST}$ .

Теперь оценим время формирования  $T_{in}$   $\tau_{form}^{PB}$  1-мм реперной КТМ в МФ-КПВ. Отметим, что в этом случае величина  $\tau_{form}^{PB} = \tau_{solid}^{PB}$ , так как начальная температура мишени  $T_{in} \sim T_{тр}$ . Другими словами, мы должны сравнивать время  $\tau_{solid}^{PB} = \tau_{solid}^{FST}$  (последний столбец табл. 1). Для этого необходимо выполнить некоторые предварительные расчёты, результаты которых представлены на рис. 7 и 8.

Т а б л и ц а 1. Время формирования 1-мм реперной КТМ методом FST для различных значений  $T_{in}$ , начальной температуры КТМ перед её инжекцией в КФ

№	Газ	2R, мкм	Тип геометрии канала	$T_{in}$ , К	W, мкм	$\langle \chi_{эф} \rangle$	$\tau_{liquid}^{FST}$ , с	$\tau_{form}^{FST}$ , с	$\tau_{solid}^{FST}$ , с
1	H <sub>2</sub>	983	Цилиндр	21	88	$2,4 \cdot 10^{-3}$	2,97	7,22	4,252
2	H <sub>2</sub>	983	Цилиндр	14	88	$2,4 \cdot 10^{-3}$	0,01	4,27	4,260

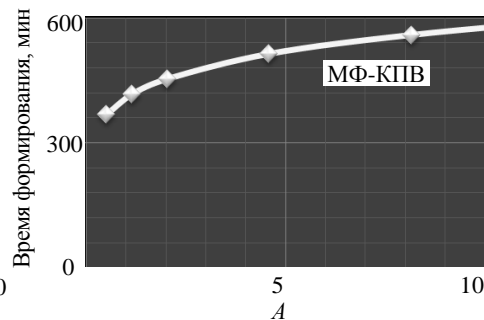
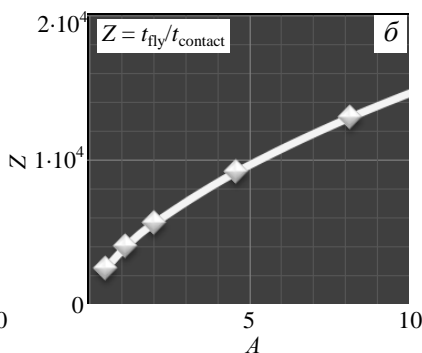
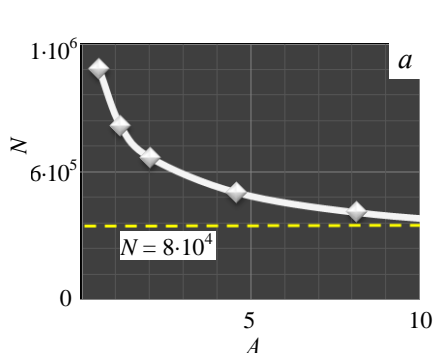


Рис. 7. Параметры формирования 1-мм реперной КТМ в зависимости от относительной амплитуды  $A$ :  $a$  — количество соударений, требующихся для формирования КТМ;  $b$  — отношение времени полёта к времени нахождения КТМ в контакте с подложкой

Рис. 8. Время формирования 1-мм реперной КТМ в зависимости от относительной амплитуды  $A$  (составит более 5 ч)

На рис. 7,  $a$  (в зависимости от высоты подскока или относительной амплитуды  $A$ , которая является параметром задачи) показаны данные по количеству соударений, необходимых для формирования 1-мм реперной КТМ в МФ-КПВ с равнотолщинным слоем, а также отношение её времени полёта к времени её нахождения в контакте с вибрирующей подложкой (рис. 7,  $b$ ). Согласно данным рис. 8 время формирования составит от 350 до 580 мин, т.е. от 5 до 10 ч для различных значений параметра  $A$ , что даёт соответственно количество соударений от  $N \sim 8 \cdot 10^4$  ( $A = 10$ ) до  $N \sim 10^6$  ( $A = 2$ ). Это означает, что обеспечение NU на уровне 1% за счёт механизма «конфетти» вполне реализуемо при формировании слоя в МФ-КПВ. Отметим, что при больших амплитудах  $A$  получается большее время формирования, однако при этом требуется меньшее количество соударений. Это связано с тем, что энергия соударения при больших  $A$  больше, соответственно больше и пятно контакта. Поэтому за одно соударение при  $A = 10$  передаёт большее количество тепла, чем при  $A = 2$ . Бóльшее же время формирования получается за счёт бóльшей длительности нахождения мишени в свободном полёте (рис. 7,  $a$ ). Особо подчеркнём, что КТМ в МФ-КПВ пребывает в свободном полёте более 99% общего времени формирования слоя. В частности, если разделить путь КТМ на две равные части, то выясняется, что две трети времени КТМ проводит выше половины высоты подскока. Таким образом, если в экспериментах по методу FST начальную температуру КТМ снизить до начальной температуры КТМ в МФ-КПВ, т.е. положить  $T_{in} = 14$  К



(табл. 2, 3-я строка), а при формировании в МФ-КПВ исключить «мёртвое время» нахождения КТМ в свободном полёте, то величина  $\tau_{\text{solid}}^{\text{FST}}$  будет близка величине  $\tau_{\text{solid}}^{\text{ПВ}}$ . Это произойдёт при вполне определённом значении амплитуды  $A$ , когда площади пятна контакта для того и другого случая сравняются. Результаты расчётов представлены на рис. 9, при этом использовались теплофизические свойства изотопов водорода, взятые из работ [12, 14, 15].

Т а б л и ц а 2. Параметры КТМ класса OMEGA, HiPER и CHGT-1

Свойство	Установка					
	OMEGA $R = 460, \Delta R = 3, W = 100$ мкм		HiPER (BT-2) $R = 1047, \Delta R = 3, W = 211$ мкм		CHGT-1 $R = 2000, \Delta R = 45, W = 200$ мкм	
	Мишень					
	D <sub>2</sub>	D—T	D <sub>2</sub>	D—T	D <sub>2</sub>	D—T
Масса мишени, мкг	50,20	61,60	505,40	636,53	4032,80	4497,50
Масса оболочки, мкг	8,40	8,40	43,25	43,25	2320,80	2320,80
Масса топлива, мкг	41,80	53,20	462,15	593,28	1712,00	2176,60
Плотность топлива, мг/см <sup>3</sup>	102,60	130,50	97,01	124,54	54,73	69,58
Давление заполнения, атм.	1097,50	1134,30	986,15	1036,14	415,10	423,80

Резюмируя сказанное, подчеркнём основные выводы моделирования:

— симметрия слоя (равнотолщинность) на уровне  $NU \sim 1\%$  за счёт механизма «конфетти» может быть достигнута лишь при достаточно большом количестве соударений —  $N \sim 10^4$  и больше;

— время вымораживания слоя по методу FST  $\tau_{\text{solid}}^{\text{FST}}$  (постоянный тепловой контакт при качении КТМ по цилиндрическому КФ) будет близко к эффективному времени формирования КТМ в МФ-КПВ  $\tau_{\text{solid}}^{\text{ПВ}}$  (прерывистый тепловой контакт);

— это свидетельствует о надёжности изучения условий формирования высокодисперсных слоёв криогенного водородного топлива в МФ-КПВ при вибрационном воздействии на КТМ.

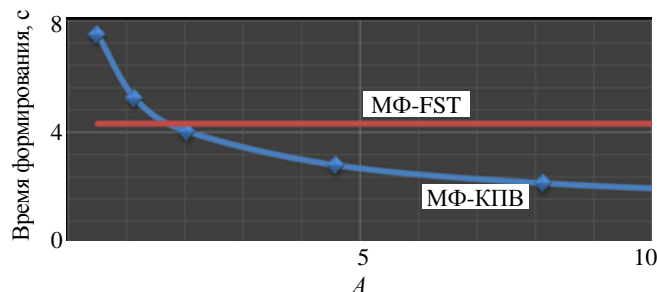


Рис. 9. Время формирования 1-мм реперной КТМ в МФ-КПВ (исключено «мёртвое время» для моды отражения в фазе полёта КТМ между последовательными соударениями)

### ПЬЕЗОВИБРАТОР С ДВУМЯ ПЛАСТИНАМИ: РАЗРАБОТКА ДИЗАЙНА НОВОГО МОДУЛЯ ФОРМИРОВАНИЯ ДЛЯ КРИОГЕННЫХ МИШЕНЕЙ ПРЯМОГО СЖАТИЯ

Основная трудность для разработки нового модуля формирования заключается в том, что время формирования даже для 1-мм реперной КТМ в МФ-КПВ составляет от 5 до 10 ч. Это время сравнимо с традиционными технологиями, которые базируются на достаточно медленном охлаждении топлива ( $\sim 3 \cdot 10^{-5}$  К/с) в неподвижной оболочке [1, 2, 12]. Одновременно с процессом выращивания слоя типа «монокристалл» осуществляется его выравнивание по толщине с помощью метода IR-redistribution (для D<sub>2</sub>-топлива) [12] либо способом  $\beta$ -layering (для D—T-смеси) [12], так что симметризация слоя осуществляется за счёт перераспределения твёрдого топлива внутри оболочки. Это приводит к значительному увеличению времени формирования слоя (от 5 до 24 ч и более) [16], что исключает возможность минимизировать запасы трития в мишенной системе. Кроме того, экспериментально показано, что такие слои неустойчивы к вариациям температуры и при охлаждении трескаются из-за напряжений, связанных с изменением плотности вещества. Указанная неустойчивость есть следствие двух причин [12, 16]: анизотропии прочности кристаллических водородов и снижения прочности D—T-слоя за счёт накопления пузырьковых дефектов из-за выделения <sup>3</sup>He при  $\beta$ -распаде трития. Так, например, измерения, выполненные в работе [17], показали, что при уменьшении температуры менее чем на 2 К гладкость поверхности криогенного слоя падает более чем в 2 раза: с  $\varepsilon_2 = 2,0$  мкм до  $\varepsilon_2 = 4,5$  мкм.

Отметим, что производство КТМ реакторного класса требует развития таких методов формирования слоя, которые будут удовлетворять требованиям по физике сжатия мишеней, а именно криогенный топливный слой должен быть изотропным, чтобы в процессе его сжатия были достигнуты требуемые плот-

ности и температуры для осуществления реакций синтеза. Возможность формирования изотропных высокодисперсных слоёв криогенного водородного топлива в МФ-КПВ при вибрационном воздействии на КТМ доказана экспериментально [1, 11]. Кроме того, необходимо минимизировать время формирования слоя, чтобы минимизировать запасы радиоактивного трития, входящего в состав топливной смеси, и обеспечить высокочастотную подачу (~10 Гц) КТМ в камеру реактора ИТС.

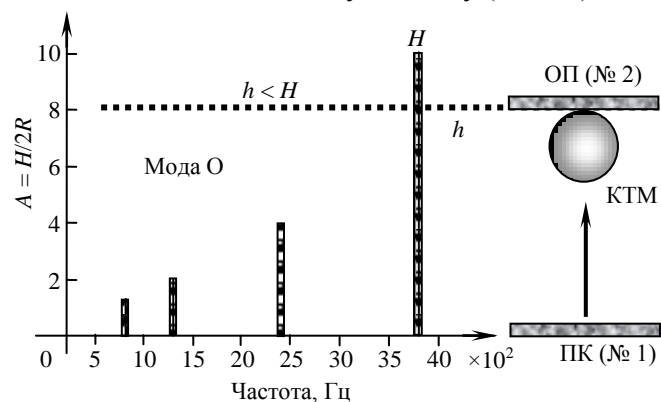


Рис. 10. Ограничение амплитуды  $A$  при использовании в МФ-КПВ второй отражающей пластины (ОП)

На следующем этапе расчётов нас будут интересовать КТМ прямого сжатия [1, 2] (табл. 2), начиная от конфигурации, соответствующей экспериментам с лазерным драйвером на установке OMEGA [18]. Дизайн КТМ для европейского проекта HiPER (High Power laser Energy Research) находится на стадии концептуализации и окончательно не утверждён [19]. Предварительно рассматривается так называемая базовая КТМ класса HiPER «Baseline Target-2» (BT-2) [20, 21]. Классические реакторные КТМ с высоким энергетическим выходом (Classical High Gain Target (CHGT)) представлены в нескольких вариантах [1, 2]. Мы остановимся на варианте CHGT-1 [22].

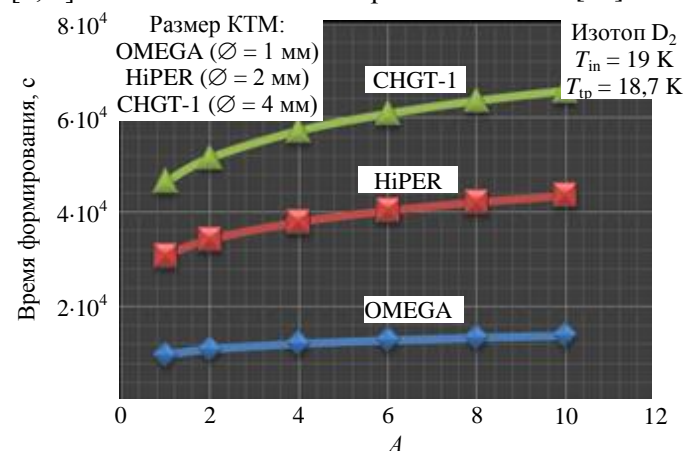


Рис. 11. Время формирования КТМ различного дизайна в МФ-КПВ с одной вибрирующей пластиной:  $\blacktriangle$  — 4 мм-target;  $\blacksquare$  — 2 мм-target;  $\blacklozenge$  — 1 мм-target

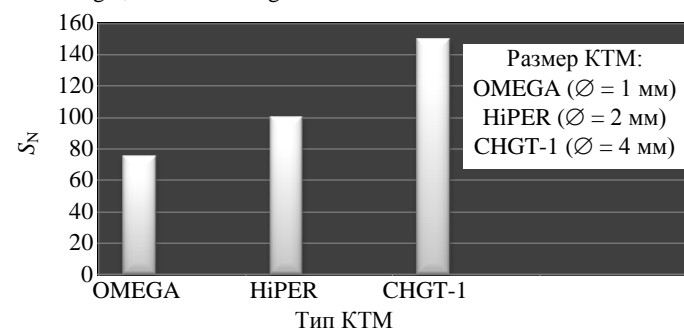


Рис. 12. Отношение суммарной площади пятна контакта к площади поверхности оболочки для различных КТМ

Очевидный путь минимизации времени формирования в МФ-КПВ при сохранении нужного количества соударений — это использование второй пластины, ограничивающей высоту подскока (см. схему на рис. 10). Как только кинетическая энергия, получаемая КТМ в результате взаимодействия с пьезокристаллической подложкой, становится велика по сравнению с разницей потенциальной энергии у верхней и нижней пластин, время формирования резко падает. Это происходит за счёт значительного уменьшения времени нахождения КТМ в свободном полёте и одновременного увеличения площади пятна контакта при соударениях.

На рис. 11 показано время формирования КТМ различного дизайна в МФ-КПВ с одной вибрирующей пластиной. Длительность процесса варьируется от 3 ч (1-мм КТМ) до 17 ч (4-мм КТМ). Результаты получены с учётом исходных параметров для рассматриваемого класса КТМ (табл. 2), рассчитанных с помощью вычислительного кода Target Production Scheme Code» (TPS-код, разработка ФИАН [4]). Чтобы получить криогенный слой значительной толщины, полимерные оболочки предварительно заполняются до высокого внутреннего давления  $P_f$  газообразным топливом из изотопов водорода, включая радиоактивный тритий в составе эквимольной дейтерий-третиевой (D—T)-смеси (50% молекул DT, 25% дейтерия ( $D_2$ ) и 25% трития ( $T_2$ )). Хорошо видно, что величина  $P_f$  при комнатной температуре (300 К) может достигать значительных величин ~1000 атм. и более как для  $D_2$ , так и D—T-топлива.

Отметим, что даже в случае одной вибрирующей пластины отношение  $S_N$  (рис. 12) суммарной площади пятна контакта  $S_c$  к площади поверхности мишени  $S_t$  для различных КТМ

$$\sum_i^N S_c^i / S_t = S_N,$$

а также количество соударений (оценка дана из расчётов, показанных на рис. 11:  $N \sim (1-6)10^5$ ) остаётся достаточно большим, чтобы сформировать равнотолщинный слой криогенного водородного топлива. Добавление ещё одной пластины практически удвоит величины  $S_N$  и  $N$ . Кроме того, эффект наличия двух пластин (отражающая пластина (ОП) может быть также и вибрирующей) позволит контролировать и скорость охлаждения КТМ, одновременно оставляя количество соударений на требуемом уровне.

Проведём анализ возможностей использования МФ-КПВ с двумя рабочими пластинами для формирования КТМ прямого сжатия. Чтобы пояснить принцип действия, обратимся к рис. 10, на котором схематично показана относительная амплитуда высоты подъёма  $A$  зависимости от частоты управляющего импульса. Из рисунка очевидно, что оптимизация режима работы МФ-КПВ (выбор расстояния  $h$ ) должна проводиться отдельно для каждой частоты управляющего импульса. При этом предполагается, что рабочие плоскости параллельны друг другу, параметры столкновения такие же, как и в случае одной плоскости (коллинеарное, упругое и проч.). Предполагается также, что в случае двух вибрирующих плоскостей обе плоскости вибрируют с одной частотой (КТМ после соударения с каждой получает одинаковое количество кинетической энергии). За время полёта в зависимости от направления движения — вверх или вниз КТМ уменьшает или увеличивает скорость. При росте скорости, получаемой при столкновении, время формирования должно уменьшаться за счёт увеличения пятна контакта. Это ещё один параметр для оптимизации работы МФ-КПВ.

Результаты расчётов для двух крайних типов КТМ (OMEGA и CHGT-1) представлены на рис. 13. При этом мы не проводили индивидуальной оптимизации процесса формирования для каждого типа КТМ ( $h$  — параметр оптимизации,  $h = (V^2/2g) + 2R$ , где  $V$  — скорость КТМ при граничном условии  $V > 0,3$  м/с), а лишь поставили задачу показать, что использование МФ-КПВ с двумя рабочими пластинами позволяет достичь для КТМ различного дизайна величин  $\tau_{solid}^{ПВ}$  менее получаса, что уже значительно меньше, чем в случае традиционных технологий, использующих неподвижную мишень (от 5 до 24 ч), а также при формировании КТМ в МФ-КПВ с одной рабочей пластиной (от 3 до 17 ч).

На рис. 14 показано время формирования для тех же двух типов КТМ (OMEGA и CHGT-1) в случае двух вибрирующих плоскостей, находящихся на расстоянии  $h = 2R + \Delta$ , где  $\Delta$  — параметр индивидуальной оптимизации, который зависит от типа КТМ и высоты подскока (параметр  $A$ ). Величина  $\Delta$  выбиралась так, чтобы КТМ оставалась в пределах  $(1/n)H$ , где  $n$  — параметр жёсткости эксперимента (обычно это 2, 3, ...). Основанием является тот факт, что КТМ в МФ-КПВ пребывает в свободном полёте более 99% общего времени формирования слоя, и если разделить её путь на две равные части, то две трети времени КТМ проводит выше половины высоты подскока. Результаты расчётов показывают, что при индивидуальной оптимизации использование МФ-КПВ

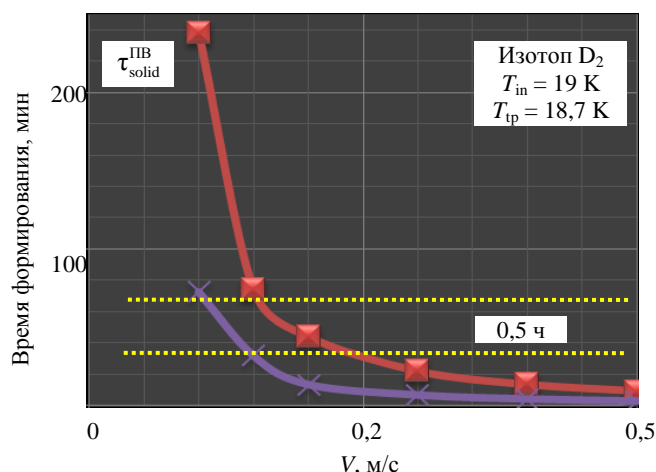


Рис. 13. Время формирования КТМ при различных скоростях отскока  $V$  от рабочих пластин, находящихся на расстоянии  $h = (V^2/2g) + R$  друг от друга: ■ — CHGT-1; × — 1 мм-target

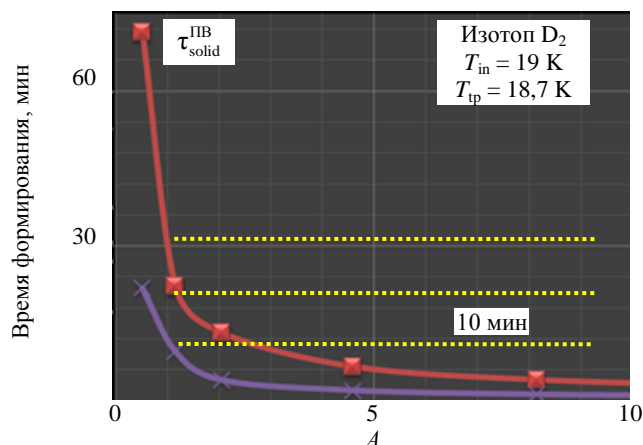


Рис. 14. Индивидуальная оптимизация: время формирования КТМ в зависимости от параметра  $A$  для случая двух вибрирующих пластин, находящихся на расстоянии  $h = 2R + \Delta$ : ■ — CHGT-1; × — 1 мм-target

с двумя вибрирующими пластинами позволяет достичь время формирования слоя менее 10 мин, причём в широком диапазоне изменения параметра  $A$ . При более жёстком ограничении по параметру  $\Delta$  можно обеспечить дальнейшее снижение времени формирования  $\tau_{\text{solid}}^{\text{ПБ}}$ . Однако ограничением здесь является требование на число ударов, достаточное для симметризации слоя, и прочность самой оболочки.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

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

В ФИАН разработан уникальный структурно-чувствительный метод FST, основанный на вымораживании криогенного топливного слоя внутри движущихся бесподвесных оболочек, что позволяет получать оптимальную микроструктуру топлива [1—10]. Такие слои относятся к классу слоёв, перспективных для производства КТМ требуемого качества и сохранения этого качества в процессе её доставки в камеру реактора ИТС.

Для оптимизации метода FST в ФИАН разработано устройство МФ-КПВ [1, 11] для моделирования процессов формирования и релаксации ультрадисперсного слоя топлива при различных внешних воздействиях. Структурирование слоя происходит вследствие диспергирования водородного топлива внутри оболочки за счёт внешнего периодического воздействия [23], осуществляемого за счёт обратного пьезоэлектрического эффекта.

МФ-КПВ позволяет изучать формирование слоя при следующих условиях:

- при различных скоростях охлаждения мишени: температура ПК может меняться от 80 до 4,2 К с точностью 0,1 К, при этом скорость охлаждения от 40 К (выше критической точки для  $\text{H}_2$  и  $\text{D}_2$ ) до 4,2 К не превосходила нижней границы для метода FST;

- при наличии периодических механических воздействий с частотой вибраций в диапазоне от 0,3 Гц до 3 МГц (определяет величину параметра  $A$ );

- при совместном воздействии двух диспергирующих факторов: скорости охлаждения жидкой фазы топлива и частоты вибраций.

МФ-КПВ позволяет (в зависимости от выбора частоты вибраций) генерировать различные моды движения КТМ — вращение (мода  $B$ ), отражение от поверхности кристалла (мода  $O$ ) и смешанная мода (мода  $C$ ). МФ-КПВ стабильно работает в области низких температур.

При моделировании использовались перечисленные параметры МФ-КПВ. Получены следующие основные результаты.

Моделирование работы МФ-КПВ с одной пластиной дало большие времена формирования для различных КТМ — от 3 до 17 ч, что характерно для традиционных зарубежных технологий, использующих неподвижную КТМ. Это объясняется тем фактом, что охлаждение КТМ в МФ-КПВ с одной пластиной происходит маленькими порциями (разделёнными большим временем нахождения КТМ в свободном полёте) и только во время её соударения с холодной пластиной ПК происходит теплоотвод от КТМ за счёт контактной теплопроводности.

Чтобы уменьшить время формирования КТМ в МФ-КПВ, необходимо ограничить время её полёта между соударениями, например, встраиванием ещё одной пластины, ограничивающей высоту подскока. В настоящей работе показано, что использование МФ-КПВ с двумя пластинами позволяет достичь для КТМ различного дизайна (OMEGA, HiPER, CHGT-1) величин времени формирования твёрдого криогенного слоя  $\tau_{\text{solid}}^{\text{ПБ}}$  менее получаса.

Результаты моделирования также показывают, что при индивидуальной оптимизации процесса формирования КТМ использование МФ-КПВ с двумя вибрирующими пластинами позволяет достичь времени  $\tau_{\text{solid}}^{\text{ПБ}}$  менее 10 мин. Это говорит о возможности использования МФ-КПВ как самостоятельного инструмента для формирования КТМ прямого сжатия с заданной структурой топливного слоя. При этом необходимо

подчеркнуть, что внешняя оболочка КТМ должна обладать значительной прочностью, чтобы снизить риск её разрушения при соударениях. Отметим, что в настоящее время активно развивается наука о материалах, которая предлагает использовать специальную обработку поверхности, связанную с созданием наноструктурных плёнок и покрытий с характерным размером кристаллитов от 1 нм до нескольких десятков нм. Благодаря своим структурным особенностям наноматериалы обладают целым рядом уникальных свойств, в частности, повышенной прочностью и твёрдостью [24]. Функциональная особенность сверхтвёрдой плёнки состоит в том, что свободные от дислокаций нанокристаллы твёрдых фаз размером 3—10 нм окружены тонкой прослойкой аморфной фазы размером 1—2 нм, и поскольку в нанокристаллах и аморфной фазе отсутствует дислокационная активность, то такие плёнки должны обладать высокими значениями сопротивления пластической деформации и упругого восстановления. Считается, что источники размножения дислокаций не могут существовать в нанокристаллитах размером менее 3 нм.

Дальнейшие исследования в этом направлении связаны с изменением конфигурации самого МФ-КПВ. Предполагается изучить вопрос об использовании квазизамкнутой полости с профилированной поверхностью, работающей в режиме генерации моды отражения или смешанной моды, причём вымораживание слоя может осуществляться одновременно в нескольких оболочках, что крайне перспективно для создания технологии массового производства КТМ. Предполагается, что оболочки обладают высокими прочностными характеристиками.

Другой подход основан на модернизации уже существующего МФ-FST, основным элементом которого является КФ в виде простой или двойной спирали. Вибрации с частотой от 3,5 до 10 кГц, способствующие структурированию топлива, будут возбуждаться в верхней части КФ, который в процессе вымораживания топлива будет служить своеобразным волноводом для передачи возмущения на поверхность движущейся КТМ. Такие условия способствуют формированию криогенного слоя в виде ультрадисперсной структуры, что обеспечивает сохранение качества слоя при ускорении, инъекции и транспорте КТМ в камеру реактора ИТС [25].

Настоящая работа выполнена при финансовой поддержке проекта РФФИ № 15-02-02497.

## REFERENCES

1. **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, № 2, p. 11.
2. **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).
3. **Aleksandrova I.V., Koresheva E.R., Krokhin O.N., Osipov I.E.** Cryogenic hydrogen fuel for controlled inertial fusion energy (manufacture of stable superdispersed layer of solid hydrogen isotopes). — In the same place, issue 2, p. 75 (in Russian).
4. **Aleksandrova I.V., Koresheva E.R., Krokhin O.N., Osipov I.E.** Cryogenic hydrogen fuel for controlled inertial confinement fusion (FST formation of cryogenic fuel layer in moving free-standing shells: theory and experiment). — In the same place, issue 3, p. 59 (in Russian).
5. **Aleksandrova I.V., Koresheva E.R., Krokhin O.N., Osipov I.E.** Cryogenic hydrogen fuel for controlled inertial confinement fusion (formation of reactor-scaled cryogenic targets). — In the same place, issue 4, p. 51 (in Russian).
6. **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.
7. **Aleksandrova I.V., Belolipetskiy A.A., Koresheva E.R., Tolokonnikov S.M.** Survivability of fuel layers with a different structure under conditions of the environmental effects: physical concept and modeling results. — *Laser and Particle Beams*, 2008, vol. 26, № 4, p. 643.
8. **Aleksandrova I.V., Koresheva E.R., Koshelev E.L. et al.** Multi-criteria optimization for the delivery process of IFE targets with a different fuel structure. — In: *2nd IAEA RCM on Coordinated Research Project Pathways to Energy from Inertial Fusion — an Integrated Approach*. Prague, Czech Republic, 19—23 May, 2008.
9. **Aleksandrova I.V., Koresheva E.R., Osipov I.E. et al.** Ultra-fine fuel layers for application to ICF/IFE targets. — *Fusion Science and Technology*, 2013, vol. 63, p. 106.

10. **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.
11. **Aleksandrova I.V., Akunets A.A., Koresheva E.R., Koshelev E.L., Timasheva T.P.** On formation of cryogenic fuel layers in conditions of highfrequency mechanical action. — *Kratkie soobshcheniya po fizike (Short messages on physics)*, 2016, № 12, p. 14 (in Russian).
12. **Kucheev S.O., Hamza A.V.** Condensed hydrogen for thermonuclear fusion. — *J. Appl. Phys.*, 2010, vol. 108, p. 091101.
13. **Ben-Ammar F., Kaviany M., Barber J.R.** Heat transfer during impact. — *J. Heat Mass Transfer*, 1992, vol. 35, № 6, p. 1495.
14. **Roder H.M., Childs G.E., McCarthy R.D., Angerhofer P.E.** Survey of the properties of the hydrogen isotopes below their critical temperature. — *NBS Technical Note, Monograph 74*, 1965.
15. **Souers P.C.** Hydrogen properties for fusion energy. — Lawrence Livermore National Laboratory, University of California Press, 1986. 203 p.
16. **Mapoles E.** Production of hydrogen ice layers for NIF targets. — In: 7th Intern. Conf. on Inertial Fusion Science and Applications. Bordeaux, France, September 12—16, 2011.
17. **Harding D.R., Elasky L.M., S.Verbridge S. et al.** Formation of deuterium-ice layers in OMEGA targets. — *LLE Review, Quarterly Rept.*, 2004, vol. 99, p. 160.
18. **McCrory R.L., Bahr R.E., Betti R. et al.** OMEGA ICF experiments and preparation for direct drive ignition on NIF. — *Nuclear Fusion*, 2001, vol. 41, № 10, p. 1413.
19. **Tolley M., F. ben Saïd, Koresheva E. et al.** HiPER targetry: production and strategy. — *Proceed. SPIE*, 2011, vol. 8080, p. 808023.
20. **Aleksandrova I.V., Belolipetskiy A.A., Kalabuhov V.A. et al.** FST-technologies for high rep-rate production of HiPER scale cryogenic targets. — *Proceed. SPIE*, 2011, vol. 8080, p. 80802M.
21. **Aleksandrova I.V., Belolipetskiy A.A., Koresheva E.R. et al.** A specialized layering module for high rep-rate producing of free standing HiPER targets. — In: 7th Intern. Conf. on Fusion Science and Applications. Bordeaux, France, September 12—16, 2011.
22. **Nakai S., Miley J.** Physics of high power laser and matter interactions. — World Scientific Publishing, Singapore, 1992.
23. **Nishanov V.N., Sobyenin A.A., Tsoi E.N.** Threshold character of diffusion growth of new phase nuclei in an external periodic field. — *Kratkie soobshcheniya po fizike (Short messages on physics)*, 1987, № 1, p. 18 (in Russian).
24. **Song H.W., Guo S.R., Hu Z.Q.** A coherent polycrystal model for the inverse Hall-Petch relation in nanocrystalline materials. — *Nanostruct. Mater.*, 1995, vol. 6, p. 203.
25. **Koresheva E.R.** FST transmission line for mass manufacturing of IFE targets. — In: 1st IAEA RCM of the CRP Pathways to Energy from Inertial Fusion: Materials Beyond Ignition. Vienna, Austria, February 16—19, 2016.

#### AUTHORS

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

**Akunets A.A.** P.N. Lebedev Physical Institute of the Russian Academy of Sciences, Leninskij Prospekt 53, 119991 Moscow, Russia

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

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

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

Received 14 June 2017  
Problems of Atomic Science and Technology  
Ser. Thermonuclear Fusion, 2017, vol. 40, issue 3, pp. 49—62