

## Отчет по проекту РФФИ № 15-02-02497

### *Теоретические и экспериментальные основы структурной релаксации термоядерного слоя топлива и сохранение оптимальных параметров слоя при доставке криогенных мишеней в фокус мощной лазерной установки или реактора*

Отчетный период: 2017 год

#### ПРЕАМБУЛА

На данный момент в исследованиях по инерциальному термоядерному синтезу крайне остро стоит проблема получения криогенного слоя топлива с заданной микроструктурой, позволяющей реализовать требования на качество слоя, а также сохранить это качество вплоть до момента облучения топлива лазерным излучением. Целью настоящего проекта является комплексное изучение процессов структурной релаксации высокодисперсного слоя термоядерного топлива и способов минимизации рисков его деградации на всех этапах доставки криогенных топливных мишеней (КТМ) в фокус мощной лазерной установки или реактора лазерного термоядерного синтеза (ЛТС).

Доставка КТМ включает два этапа: (1) ускорение в инжекторе линейного носителя (т.н. сабота) вместе с КТМ и (2) полет инжектированной КТМ в камере реактора. При этом возникают следующие источники разрушения мишени: (1) механические и магнитные перегрузки при ускорении ансамбля «КТМ + сабот», (2) тепло, выделяющееся из-за трения сабота о стенку направляющей трубки инжектора и (3) тепловое излучение стенок камеры реактора.

В 2015 году был начат теоретический анализ условий, минимизирующих риски деградации топливного слоя внутри КТМ в процессе ее доставки. В том числе разработана физическая модель, описывающая изменение распределения температуры КТМ с топливным слоем из твердых изотопов, начата оптимизация развитой ранее модели отклика структуры слоя на внешний тепловой удар, проведен расчет условий, определяющих управление движением КТМ и сверхпроводящего сабота с помощью эффекта квантовой левитации. Были также проведены всесторонние мероприятия по подготовке эксперимента по безопасной доставке КТМ. В том числе, был изготовлен массив опытных образцов на основе высокотемпературных сверхпроводников (ВТСП) 2-х типов – сверхпроводящая керамика на основе  $YBa_2Cu_3O_{7-x}$  (аббревиатура Y123) производства ФИАН и ВТСП-ленты 2-го поколения на основе Gd123 производства ЗАО СуперОкс. Изготовлены следующие образцы: массив тест-объектов различной геометрии и размера, саботы различной геометрии, полимерные сферические оболочки (производства ФИАН) с внешним ВТСП покрытием. Для изготовления сплошных ВТСП образцов на основе Y123 применялся метод твердофазных реакций. Для реализации ВТСП покрытия сферических оболочек была разработана технология изготовления оригинального ВТСП композита из вязкого полимера со встроенными микрочастицами из сверхпроводящей Y123 керамики размером от 10 до 50 мкм. Кроме того были изготовлены несколько вариантов магнитных систем (т.н. PMG-системы), предназначенных для исследований в области квантовой левитации изготовленных ВТСП образцов. Предварительные эксперименты продемонстрировали стабильную левитацию в магнитном поле сверхпроводящих Ga123-образцов, изготовленных в виде куска ленты либо сборного ВТСП-сабота.

В 2016 году работа над проектом была продолжена. В том числе, проведено моделирование по структурной релаксации термоядерного слоя топлива и сохранению оптимальных параметров слоя при доставке КТМ в фокус мощной лазерной установки или

реактора. Показано, что формирование изотропных высокодисперсных криогенных слоев является не только условием получения качественного топлива, но и условием сохранения этого качества вплоть до момента облучения КТМ мощным импульсом лазерного излучения. В частности, криогенный слой с анизотропией более 10 % даже при относительно низком уровне поглощения порядка  $0.5 \text{ Вт/см}^2$  деградирует вследствие роста его шероховатости еще до момента прихода инжектированной КТМ в центр реакторной камеры.

Проведено моделирование и оптимизация формы мишенного гнезда внутри сабота с целью минимизации риска разрушения КТМ под действием механических перегрузок. Показано, что применение конической опоры с углом в основании конуса равным  $87^0$  позволяет повысить допустимые перегрузки в процессе ускорения ансамбля «КТМ + ВТСП сабот» более чем в 20 раз. Таким образом, применение конического гнезда позволяет снизить риски разрушения КТМ при ускорении, а также уменьшить габариты инжектора.

Для проведения исследований по экспериментальному моделированию был создан стенд, состоящий из 2-х подсистем (№1 и №2), обеспечивающих работу как при азотных (80 К), так и при гелиевых (4.2–20 К) температурах. Эксперименты, проведенные на подсистеме №1, показали, что применение вибраций при одновременной реализации относительно высоких скоростей охлаждения способствует получению топливного слоя в изотропном высокодисперсном состоянии. Это открывает перспективы для реализации массового производства КТМ реакторного класса, устойчивых к механическому и тепловому воздействиям. Эксперименты, проведенные на подсистеме №2, подтвердили возможность применения эффекта квантовой левитации для бесконтактного позиционирования и коррекции траектории движения ВТСП сабота и КТМ.

По результатам, полученным в проекте, в 2016 г. был осуществлен патентный поиск на тему «Бесконтактная доставка криогенных мишеней» при использовании сверхпроводящих носителей для КТМ. Обнаружено, что на настоящем уровне развития техники неизвестны способы, аналогичные объекту данного патентного поиска. Заявка на соответствующий патент подана в Федеральную службу по интеллектуальной собственности, дата регистрации заявки 07.12.2016 г.

В 2017 году было завершено комплексное изучение процессов структурной релаксации термоядерного слоя топлива и способов минимизации рисков его деградации на всех этапах доставки КТМ в фокус мощной лазерной установки или реактора ЛТС. В ходе работы над проектом выполнены следующие задачи:

1. Осуществлено моделирование структурной релаксации термоядерного слоя топлива при периодическом механическом воздействии (т.е. воздействии вибраций) на КТМ, включая:
  - 1.1. Моделирование работы пьезовибратора с двумя вибрирующими пластинами с целью уменьшения времени формирования изотропных ультрадисперсных криогенных слоев;
  - 1.2. Расчет времени формирования высокодисперсного слоя для различных КТМ, начиная от КТМ для установки OMEGA до КТМ реакторного класса (CHGT-1);
  - 1.3. Рекомендации по разработке нового модуля формирования для КТМ различного дизайна.
2. Завершена разработка концепции инжектора с системой коррекции траектории сабота (носителя КТМ), работающей на основе эффекта квантовой левитации ВТСП.
3. Завершена разработка концепции системы защиты топливного слоя КТМ, как элемента технологической базы мощной лазерной установки или реактора ЛТС.
4. Завершено патентование результатов проекта.

Детальное изложение результатов, полученных за третий год работы по проекту РФФИ № 15-02-02497, представлено ниже.

# **I. МОДЕЛИРОВАНИЕ СТРУКТУРНОЙ РЕЛАКСАЦИИ ВЫСОКОДИСПЕРСНОГО ТОПЛИВНОГО СЛОЯ ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ ВИБРАЦИЙ НА КТМ**

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: отклонения от сферичности и концентричности  $\varepsilon_1$  должны составлять не более 1%, а локальные неоднородности на поверхности топливного слоя  $\varepsilon_2$  не должны 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 твердого 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]. Твердый 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 нано кристаллический (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 ее доставке в реактор ИТС. Формирование качественных слоев водородного топлива возможно, прежде всего, за счет 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 твердый слой в ультрадисперсном состоянии [3, 6–9]. По существу, речь идет 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», который обеспечивает внешнее вибрационное воздействие на КТМ при реализации относительно высоких скоростей охлаждения (Рис. 1–5).

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.

## **1. МОДЕЛИРОВАНИЕ ОСНОВНЫХ ПРОЦЕССОВ ПРИ ОХЛАЖДЕНИИ ОБОЛОЧКИ С ТОПЛИВОМ В КРИОГЕННОМ ПЬЕЗОВИБРАТОРЕ С УЧЕТОМ МЕХАНИЧЕСКИХ И ТЕПЛОВЫХ ВОЗДЕЙСТВИЙ НА КТМ**

Модуль формирования «криогенный пьезо-вибратор» (МФ-КПВ) размещается внутри оптической тестовой камеры (ТК), расположенной в нижней части криостата. Внутри МФ-КПВ размещена пьезокристаллическая пластина с закрепленными концами (Рис. 1а). Движение КТМ

относительно поверхности пьезокристалла (ПК) осуществляется за счет 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*, Рис.1б) и отражение от поверхности кристалла (*мода O*, рис.1а), а также 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 (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  $\varnothing = 1$  мм до 2 мм, заполненных 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 (Рис. 3), либо с двумя пластинами (Рис. 4). Типичные результаты экспериментов представлены на рис. 5, в которых использовалась одна пластина — ПК (Рис. 5а), а также полимерная оболочка  $\varnothing = 1,5$  мм, заполненная водородом до 400 атм при комнатной температуре. Хорошо видно, что в отсутствии вибраций ( $\nu = 0$ ) образуется крупнокристаллическая структура водорода (Рис. 5б). При той же скорости охлаждения  $q = 0,5$  К/с, но в присутствии вибраций ( $\sim 10$  кГц) формируется уже высокодисперсная структура твердого водородного слоя (Рис. 5в) (детали см. в [1, 11]).

Основная задача настоящего исследования — оптимизировать условия формирования ультрадисперсного слоя внутри КТМ за счет перехода в МФ-КПВ от одной вибрирующей пластины к двум пластинами, причем 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 экспериментальные результаты, которые были получены в ФИАН ранее при формировании мишеней по методу FST.

### 1.1. Условия эксперимента и постановка задачи.

Начнем 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:

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

Здесь  $m$  — масса мишени,  $V$  — скорость в момент соударения,  $E$  — модуль Юнга для материала оболочки. Изменение радиуса пятна контакта со временем описывается формулой:

$$r(t) = r_{\max} \left[ \sin \pi \left( \frac{t}{2t_3} \right) \right]^{1/2}, \quad 0 \leq t \leq t_3 \quad (3)$$

$$r(t) = r_{\max} \left[ \cos \pi \left( \frac{t-t_3}{2t_o} \right) \right]^{1/2}, \quad t_3 \leq t \leq t_3 + t_o \quad (4)$$

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

$$S_c(t) = \pi r_{\max}^2 \left[ \sin \pi \left( \frac{t}{2t_3} \right) \right], \quad 0 \leq t \leq t_3 \quad (5)$$

$$S_c(t) = \pi r_{\max}^2 \left[ \cos \pi \left( \frac{t-t_3}{2t_o} \right) \right], \quad t_3 \leq t \leq t_3 + t_o \quad (6)$$

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

4. Внешняя поверхность КТМ (т.е. ее 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 будет следующим — это полимерная оболочка, содержащая жидкое топливо вблизи температуры тройной точки, т.е. слегка выше  $T_p$ . 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 еще 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 полете между последовательными соударениями,
- фаза непосредственного соударения мишени с подложкой.

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

- за счет излучения,
- за счет 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 расчеты, показывающие, что для охлаждения реперной КТМ за счет излучения от температуры 14 К до вымораживания топливного слоя потребуется около  $1,25 \cdot 10^5$  с или  $\sim 35$  часов. Этот результат означает, что при решении задачи мы вполне можем ограничиться лишь механизмом теплопередачи при соударении КТМ с подложкой из ПК, т.е. за счет только контактной теплопроводности. Тогда охлаждение топлива в КТМ и образование твердого слоя льда можно представить себе как поочередное 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 лед 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:

$$\varepsilon \approx 10^2 / \sqrt{N} \quad (7)$$

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 перейдем к вопросу оценки количества тепла  $Q_{out}$ , передаваемого теплой КТМ при однократном ударе о холодную подложку (ПК). Согласно закону Фурье количество теплоты  $Q_{out}$ , проходящее через элемент поверхности  $dS$  за промежуток времени  $dt$ , пропорционально градиенту температуры  $dT/dr$ :

$$\frac{dT}{dr} = \frac{T_1 - T_2}{L}, \quad (8)$$

$$Q_{out} = k(T) \cdot dS \cdot \frac{dT}{dr} \cdot dt. \quad (9)$$

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, то 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  $L$ .

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,

идет на деформацию оболочки. Предполагается, что оболочка остается сферой постоянного радиуса за исключением сегмента ее нижней части, который деформируясь, превращается в круговое пятно того же радиуса, но меньшей площади (Рис. 6а). Учитывая, что энергия упругой деформации ( $W \approx E \cdot \Delta V$ ) соответствует работе, связанной с перемещением центра тяжести оболочки, можно получить интересующую нас оценку для площади пятна контакта. Для удобства оценок введем следующие параметры:

$$\chi = \frac{\pi r_{\max}^2}{4\pi R^2} = \frac{S_c^{\max}}{4\pi R^2} \text{ и } \delta = \frac{\Delta R}{R}. \quad (10)$$

Тогда изменение объема оболочки в процессе удара можно записать следующим образом (для типичных оболочек  $\Delta R/R \ll 1$ ):

$$\Delta V = \delta \pi R^3 \cdot \left( \frac{1}{12} \frac{r^4}{R^4} + \dots \right), \text{ так что } \Delta W \approx E \cdot \Delta V \approx \chi^2 \frac{4}{3} \pi R^3 E \delta.$$

Поскольку деформация оболочки КТМ происходит при её столкновении с пластинкой ПК (КТМ налетает на ПК со скоростью  $V$ ), то кинетическая энергия КТМ и расходуется на упругую деформацию оболочки и образование пятна контакта. Приравнивая  $W_{kin}$  и  $\Delta W$ , находим параметр  $\chi$  в формуле (10):

$$\chi \approx \sqrt{\frac{3mV^2}{8\pi R^3 E \delta}}. \quad (11)$$

Тогда максимальная площадь пятна контакта составит величину:

$$S_c^{\max} = \sqrt{\frac{6\pi m V^2}{E \Delta R}}. \quad (12)$$

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

Теперь нам осталось оценить линейные размеры той части оболочки, которая эффективно участвует в теплообмене с подложкой. Отметим, что за время соударения разные точки оболочки охлаждаются 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 упадет 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

$$\frac{dT}{dt} = b \frac{d^2 T}{dr^2}.$$

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:

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

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

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

Подставляя найденное нами ранее значение (12) для максимальной площади пятна контакта в выражение (13), запишем величину  $Q_{out}$  через параметры КТМ:

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

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

## 1.2. Результаты моделирования и анализ полученных данных.

Для удобства последующего сравнения полученных результатов с уже имеющимися экспериментальными и расчетными данными пусть исследуемая КТМ будет имеет те же параметры, что и реперная, сформированная методом FST ( $\varnothing = 0,983 \text{ мм} \sim 1 \text{ мм}$ ,  $\Delta R = 15 \text{ мкм}$ ,  $W = 88 \text{ мкм}$  ( $\text{H}_2$ )).

Цикл формирования по методу FST реализуется следующим образом [1—5]. Находящиеся в контейнере оболочки с жидким (или газообразным) топливом инжeksiруются в канал формирования (КФ), который представляет собой специальную вставку в криостат в виде вакуумированной трубки с охлаждаемыми стенками (транспортный канал на рис. 1а). При движении оболочки по КФ в результате ее контакта с холодной стенкой последнего происходит ее охлаждение и вымораживание топлива на внутренней стенке полой сферической оболочки за счет 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  $T_{tp}$  (время  $\tau_{liquid}^{FST}$ ),

— *Вторая стадия*: вымораживание слоя при температуре  $T = T_{tp}$  (время  $\tau_{solid}^{FST}$ ).

— Полное время формирования составит величину  $\tau_{form}^{FST} = \tau_{liquid}^{FST} + \tau_{solid}^{FST}$ .

Теперь оценим время формирования  $\tau_{form}^{ПВ}$  1-мм реперной КТМ в МФ-КПВ. Отметим, что в этом случае величина  $\tau_{form}^{ПВ} = \tau_{solid}^{ПВ}$ , так как начальная температура мишени  $T_m \approx T_{tp}$ . Другими словами, мы должны сравнивать времена  $\tau_{solid}^{ПВ}$  и  $\tau_{solid}^{FST}$  (последний столбец Таблицы 1).

Для этого необходимо выполнить некоторые предварительные расчеты, результаты которых представлены на Рис. 7 и 8.



**Таблица 1.** Время формирования 1-мм реперной КТМ методом FST для различных значений  $T_{in}$

№	Газ	$2R$ (мкм)	Тип геометрии канала	$T_{in}$ (К)	$W$ (мкм)	$\langle \chi_{eff} \rangle$	$\tau_{liquid}^{FST}$ (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

**Примечание:**  $T_{in}$ , — начальная температура КТМ перед ее инжекцией в КФ

На Рис. 7а (в зависимости от высоты подскока, или относительной амплитуды  $A$ , которая является параметром задачи) приведены данные по количеству соударений, необходимых для формирования 1-мм реперной КТМ в МФ-КПВ с равнотолщинным слоем, а также отношение времени её полета к времени нахождения её в контакте с вибрирующей подложкой (рис. 7б). Согласно данным Рис. 8, времена формирования составят от 350 до 580 мин, т.е. от 5 до 10 ч для различных значений параметра  $A$ , что дает 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  $A = 10$  передает большее количество тепла, чем при  $A = 2$ . Бóльшее же время формирования получается за счет бóльшей длительности нахождения мишени в свободном полете (Рис. 7а). Особо подчеркнем, что КТМ в МФ-КПВ пребывает в свободном полете более 99% общего времени формирования слоя. В частности, если разделить путь КТМ на две равных 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 (см. Таблицу 2, 3-ая строка), а при формировании в МФ-КПВ исключить «мертвое время» нахождения КТМ в свободном полете, то величина  $\tau_{solid}^{FST}$  будет близка величине  $\tau_{solid}^{PB}$ . Это произойдет при вполне определенном значении амплитуды  $A$ , когда площади пятна контакта для того и другого случая сравняются. Результаты расчетов представлены на рис. 9, при этом использовались теплофизические свойства изотопов водорода, взятые из работ [12, 14, 15].

Резюмируя сказанное, подчеркнем 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  $\tau_{solid}^{FST}$  (постоянный тепловой контакт при качении КТМ по цилиндрическому КФ) будет близко к эффективному времени формирования КТМ в МФ-КПВ  $\tau_{solid}^{PB}$  (прерывистый тепловой контакт).
- Это свидетельствует о надежности метода при изучении условий формирования высокодисперсных слоев криогенного водородного топлива в МФ-КПВ при вибрационном воздействии на КТМ.

## 2. 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 DT-смеси) [12], так что симметризация слоя осуществляется за счет 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]: 1) анизотропии прочности кристаллических водородов и 2) снижения прочности D–T слоя за счет 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 поверхность 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 плотности и температуры для осуществления реакций синтеза. Возможность формирования изотропных высокодисперсных слоев 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 ( $\sim 10$  Гц) КТМ в камеру реактора ИТС.

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 счет значительного уменьшения времени нахождения КТМ в свободном полете и одновременного увеличения площади пятна контакта при соударениях.

На следующем этапе расчетов нас будут интересовать КТМ прямого сжатия [1, 2] (Таблица 2), начиная от конфигурации, соответствующей экспериментам с лазерным драйвером на установке OMEGA [18]. Дизайн КТМ для европейского проекта HiPER (**H**igh **P**ower laser **E**nergy **R**esearch) находится на стадии концептуализации и окончательно не утверждён [19]. Предварительно рассматривается так называемая базовая КТМ класса HiPER «**B**aseline **T**arget-2» (BT-2) [20, 21]. Классические реакторные КТМ с высоким энергетическим выходом (**C**lassical **H**igh **G**ain **T**arget (CHGT)) представлены в нескольких вариантах [1, 2]. Мы остановимся на варианте CHGT-1 [22].

**Таблица 2.** Параметры КТМ класса OMEGA, HiPER и CHGT-1.

Установки	OMEGA		HiPER (BT-2)		CHGT-1	
	R = 460 мкм ΔR = 3 мкм W = 100 мкм		R = 1047 мкм ΔR = 3 мкм W = 211 мкм		R = 2000 мкм ΔR = 45 мкм W = 200 мкм	
Мишени	D2	D-T	D2	D-T	D2	D-T
Масса мишени	50,20	61,60	505,40	636,53	4032,80	4497,50
Масса оболочки	8,40	8,40	43,25	43,25	2320,80	2320,80
Масса топлива	41,80	53,20	462,15	593,28	1712,00	2176,60
Плотность топлива	102,60	130,50	97,01	124,54	54,73	69,58
Давление заполнения	1097,50	1134,30	986,15	1036,14	415,10	423,80

**Примечание:** единицы — масса (мкг), плотность (мг/см<sup>3</sup>), давление (атм)

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 учетом исходных параметров для рассматриваемого класса КТМ (Таблица 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-тритиевой (D-T) смеси (50% молекул DT, 25% дейтерия (D<sub>2</sub>) и 25% трития (T<sub>2</sub>)). Хорошо видно, что величина  $P_f$  при комнатной температуре (300 К) может достигать значительных величин ~ 1000 атм и более как для D<sub>2</sub>, 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 расчетов, показанных на рис. 11:  $N \sim (1-6) \cdot 10^5$ ) остается достаточно большим, чтобы сформировать равнотолщинный слой криогенного водородного топлива. Добавление еще 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.

Проведем 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  $A$  высоты подъема КТМ в 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 полета, в зависимости от направления движения — вверх или вниз, КТМ уменьшает или увеличивает скорость. При росте скорости получаемой при столкновении, время формирования должно уменьшаться за счет увеличения пятна контакта. Это еще один параметр для оптимизации работы МФ-КПВ.

Результаты расчетов 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  $(1/n) \cdot H$ , где  $n$  — параметр жесткости эксперимента (обычно это 2, 3,...). Основанием является тот факт, что КТМ в МФ-КПВ пребывает в свободном полете более 99% общего времени формирования слоя, и если разделить её путь на две равных части, то две трети времени КТМ проводит выше *половины высоты* подскока. Результаты расчетов показывают, что при индивидуальной оптимизации использование МФ-КПВ с двумя вибрирующими пластинами позволяет достичь времен формирования слоя менее 10 мин, причем в широком диапазоне изменения параметра  $A$ . При более жестком ограничении по параметру  $\Delta$  можно обеспечить дальнейшее снижение времени  $\tau_{solid}^{ПВ}$  формирования. Однако, ограничением здесь является требование на число ударов, достаточное для симметризации слоя, и прочность самой оболочки.

### 3. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На данный момент в исследованиях по ИТС крайне остро стоит проблема получения с 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, является ключевым моментом 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 слоев, перспективных для производства КТМ требуемого качества и сохранения этого качества в процессе ее 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 счет внешнего периодического воздействия [23], осуществляемого за счет обратного пьезоэлектрического эффекта.

МФ-КПВ позволяет изучать формирование слоя при следующих условиях:

— при различных скоростях охлаждения мишени → температура ПК может меняться от 80 К до 4,2 К с точностью 0.1 К, при этом скорость охлаждения от 40 К (выше критической точки для  $H_2$  и  $D_2$ ) 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 параметры МФ-КПВ, перечисленные выше. 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 (разделенными большим временем нахождения КТМ в свободном полете), и только во время её соударения с холодной пластиной ПК происходит теплоотвод от КТМ за счет контактной теплопроводности.

■ Чтобы уменьшить время формирования КТМ в МФ-КПВ необходимо ограничить время ее полета 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 твердого криогенного слоя  $\tau_{solid}^{ПВ}$  менее получаса.

■ Результаты моделирования также показывают, что при индивидуальной оптимизации процесса формирования КТМ использование МФ-КПВ с двумя вибрирующими пластинами позволяет достичь времен  $\tau_{solid}^{ПВ}$  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 ее разрушения при соударениях. Отметим, что в настоящее время активно развивается наука о материалах, которая предлагает использовать специальная обработку поверхности, связанную с созданием наноструктурных пленок 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 твердостью [24]. Функциональная особенность сверхтвердой пленки состоит в том, что свободные от дислокаций нанокристаллы твердых 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 пленки должны обладать высокими значениями сопротивления пластической деформации и упругого восстановления. Считается, что источники размножения дислокаций не могут существовать в нано кристаллитах 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, причем 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, инжекции и транспорте КТМ в камеру реактора ИТС [25–27].

■ Особо подчеркнем, что формирование слоя с изотропной ультрадисперсной структурой является ключевым направлением при создании многоуровневой системы защиты топливного слоя в КТМ-капсуле (РАЗДЕЛ III настоящего отчета). Это позволяет снизить его чувствительность к внешним тепловым и механическим перегрузкам. Такие ультрадисперсные слои можно отнести к классу слоев, обладающих свойством самосохранения, имея в виду их высокую механическую и тепловую устойчивость. По существу, речь идёт о получении новых функциональных структур топливного слоя, обладающих долгоживущими характеристиками качества.

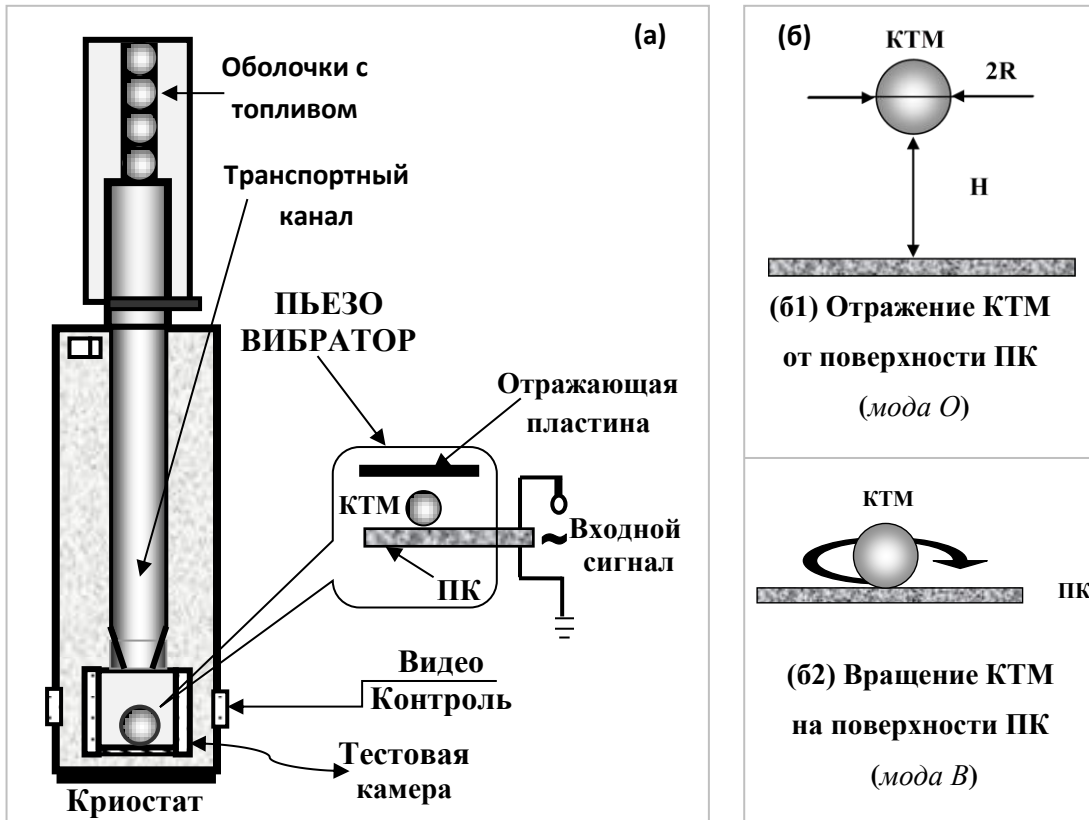
Результаты, полученные за отчетный период в рамках математического моделирования (РАЗДЕЛ I настоящего отчета), опубликованы в работе [28].

## ЛИТЕРАТУРА К РАЗДЕЛУ I

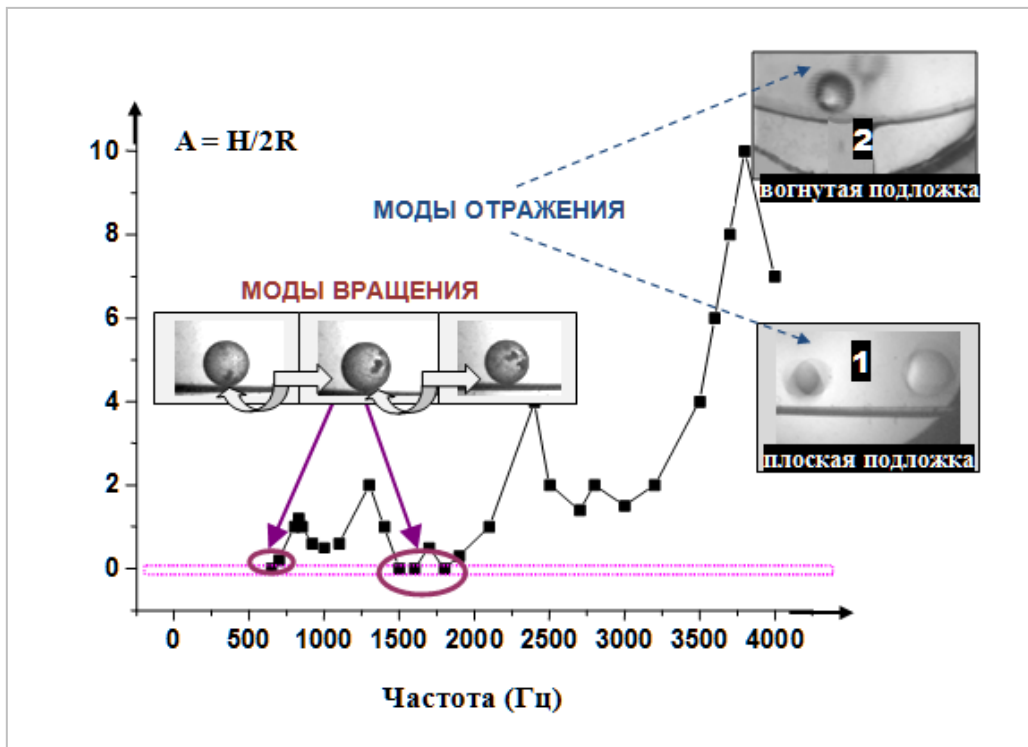
1. Aleksandrova I.V. and Koresheva E.R. *Review on high repetition rate and mass production of the cryogenic targets for laser IFE*. High Power Laser Science and Engineering, 2017, vol. 5, p. e11.
2. Александрова И.В., Корешева Е.Р., Крохин О.Н., Осипов И.Е. *Криогенное водородное топливо для управляемого инерциального термоядерного синтеза. Обзор мировых результатов*. Вопросы Атомной Науки и Техники. Сер. Термоядерный синтез, 2015, т. 38, вып. 1, с. 57.
3. Александрова И.В., Корешева Е.Р., Крохин О.Н., Осипов И.Е. *Криогенное водородное топливо для управляемого инерциального термоядерного синтеза. Получение устойчивого ультрадисперсного слоя из твёрдых изотопов водорода*. Там же, вып. 2, с. 75.
4. Александрова И.В., Корешева Е.Р., Крохин О.Н., Осипов И.Е. *Криогенное водородное топливо для управляемого инерциального термоядерного синтеза. FST-формирование криогенного слоя топлива в движущейся бесподвесной оболочке: теория и эксперимент*. — Там же, вып. 3, с. 59.
5. Александрова И.В., Корешева Е.Р., Крохин О.Н., Осипов И.Е. *Криогенное водородное топливо для управляемого инерциального термоядерного синтеза. FST-формирование криогенных мишеней реакторного класса*. — Там же, вып. 4, с. 51.
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: 2<sup>nd</sup> 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., Ospov 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. Александрова И. В., Акунец А. А., Корешева Е. Р., Кошелев Е. Л., Тимашева Т.П. *О формировании криогенных топливных слоев в условиях высокочастотного механического воздействия*. — Краткие Сообщения по Физике, 2016, № 12, p. 14.
12. Kucheev S.O. and Hamza A.V. *Condensed hydrogen for thermonuclear fusion*. — J. Appl. Phys., 2010, vol. 108, p. 091101.
13. Ben-Ammar F., Kaviani M. and 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 7<sup>th</sup> International conference 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 7<sup>th</sup> International conference on Fusion Science and Applications (Bordeaux, France, September 12—16, 2011)
22. Nakai S. and Miley J. *Physics of high power laser and matter interactions*. — World Scientific Publishing, Singapore, 1992.
23. Нишанов В.Н., Собянин А.А., Цой Э.Н. *Пороговый характер диффузионного роста зародышей новой фазы во внешнем периодическом поле*. — Краткие Сообщения по Физике 1987, №1, с. 18.
24. Song H.W., Guo S.R., and Hu Z.Q. *A coherent polycrystal model for the inverse Hall-Petch relation in nanocrystalline materials*. — Nanostruct. Mater., 1995, vol. 6, p. 203.
25. I.V. Aleksandrova, E.R. Koresheva, O.N. Krokhin, I.E. Osipov. *Cryogenic hydrogen fuel for controlled inertial confinement fusion (formation of reactor-scale cryogenic targets)*. Physics of Atomic Nuclei, **79** (7), 86, 2016
26. I.V.Aleksandrova, E.R. Koresheva, E.L.Koshelev, A.I.Nikitenko, and I.E.Osipov. *Conception of cryogenic target factory for mass manufacturing and high-rep-rate delivery of IFE targets*. 34<sup>th</sup> European conference on Laser Interaction with Matter (September 18–23, 2016, Moscow, Russia)
27. Koresheva E.R. *FST transmission line for mass manufacturing of IFE targets*. — In 1<sup>st</sup> IAEA RCM of the CRP Pathways to Energy from Inertial Fusion: Materials beyond ignition. (Vienna, Austria, February 16–19, 2016)
28. И.В.Александрова, А.А.Акунец, Е.Р.Корешева, Е.Л.Кошелев, Т.П.Тимашева. *Формирование ультрадисперсного водородного слоя при внешнем вибрационном воздействии на криогенную мишень*. Вопросы Атомной Науки и Техники. Сер. Термоядерный синтез, 2017, т. 40, вып. 3, с.49

РИСУНКИ К РАЗДЕЛУ I

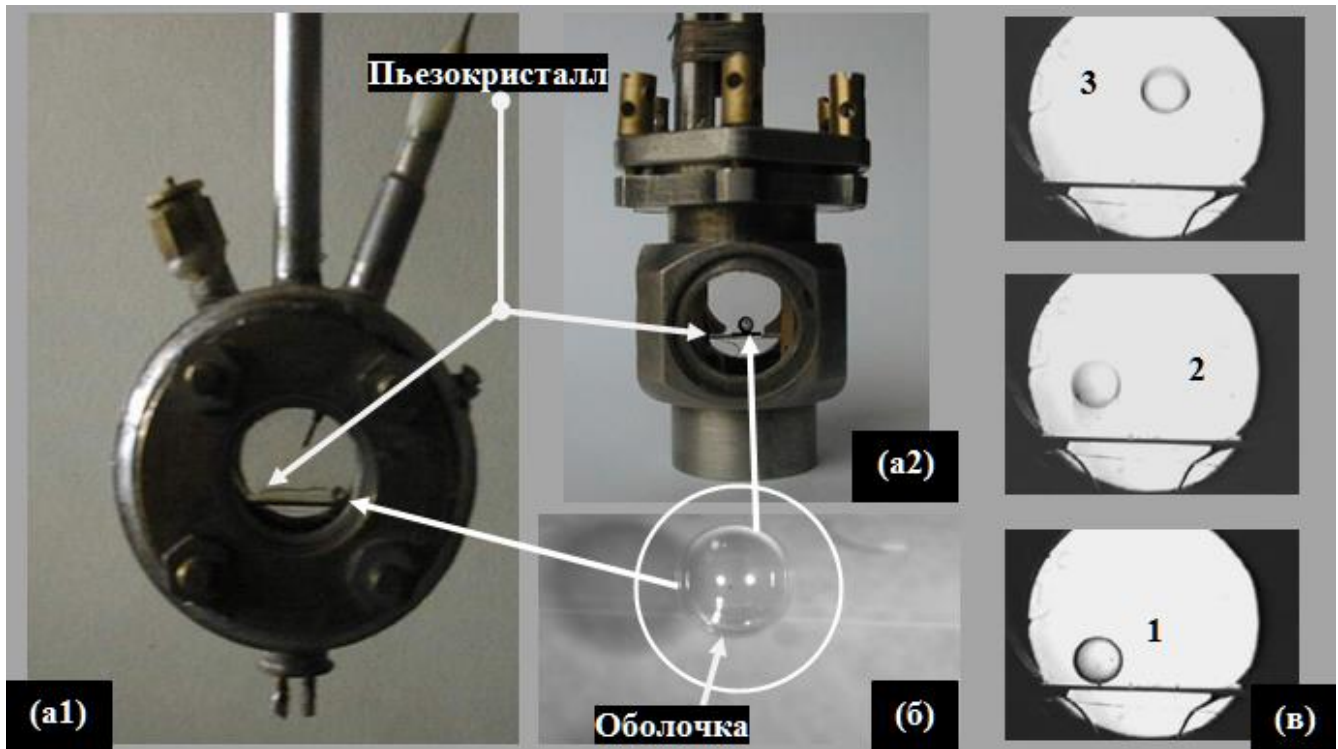


**Рис. 1.** Функциональная схема МФ-КПВ, предназначенного для исследования процессов структурирования топливного слоя внутри полых сферических оболочек: (а) размещение в криостате системы «КТМ + ПК»; (б) основные генерируемые моды движения КТМ в МФ-КПВ.

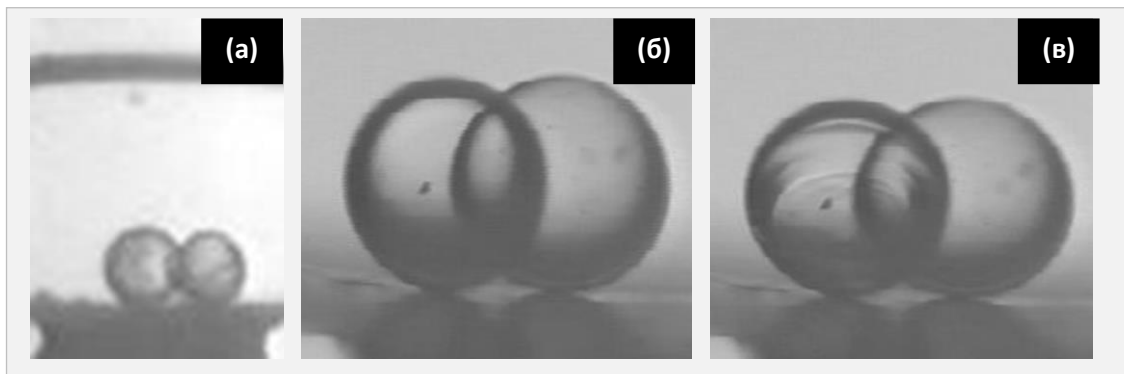


**Рис. 2.** Относительная амплитуда  $A$  высоты подъема КТМ в зависимости от частоты управляющего импульса ( $H$  — высота максимального подъема,  $R$  — внешний радиус оболочки). Параметры мод: *мода B* ( $\nu = 600$  Гц,  $U = 75$  В,  $T = 6$  К), *мода O* ( $\nu = 3,7$  кГц,  $U = 75$  В,  $T =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

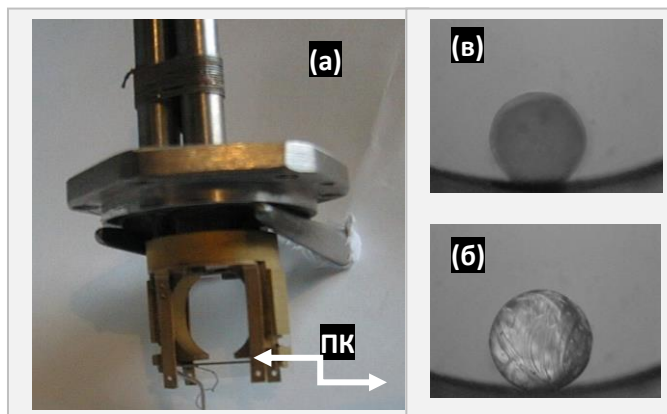




**Рис. 3.** Общий вид оптической ТК и рабочих элементов МФ-КПВ (a1, a2 и б), а также видео кадры (в) — результаты записи эксперимента при работе МФ-КПВ с одной вибрирующей пластиной (параметры  $\nu = 1,2$  кГц,  $U = 1.5$  В) при температуре  $T = 20$  К.



**Рис. 4.** МФ-КПВ с верхней отражающей поверхностью (а): кадр (б) — полимерные оболочки до начала эксперимента, (в) при подаче входного управляющего сигнала.



**Рис. 5.** Крепление ПК в рамке держателя МФ-КПВ (а). 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 твердого водородного слоя (в).

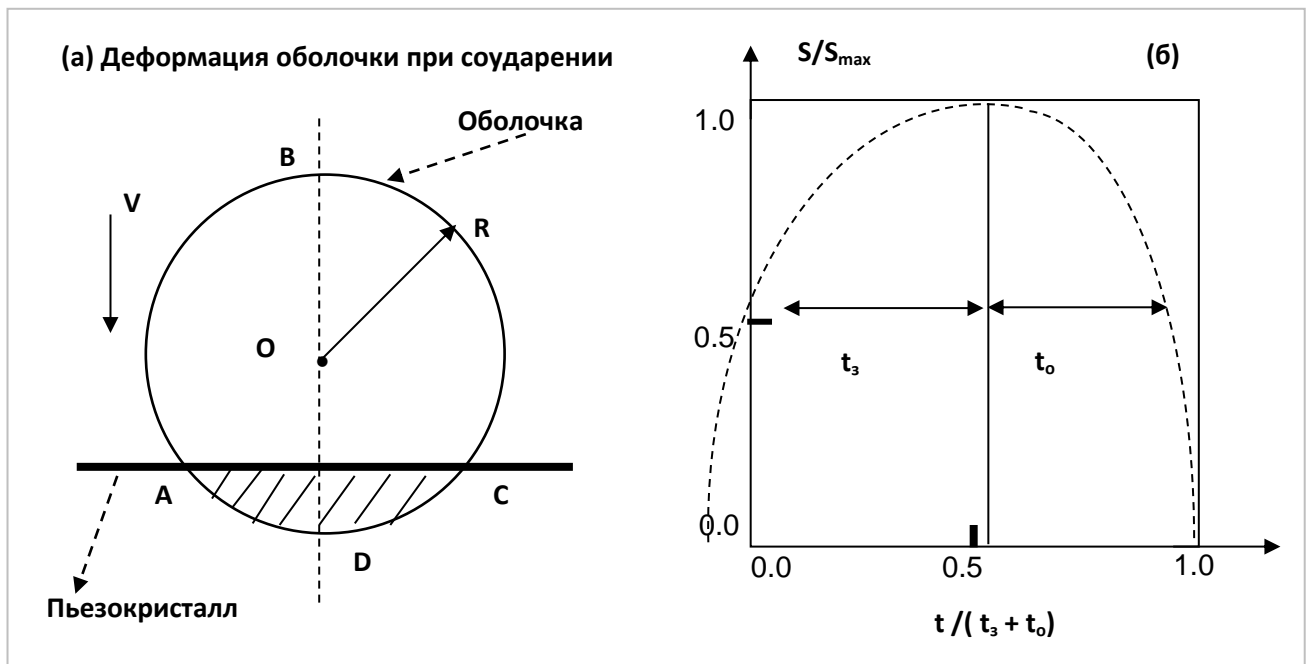


Рис. 6. Образование (а) и временная динамика (б) пятна контакта при соударении о пьезокристалл.

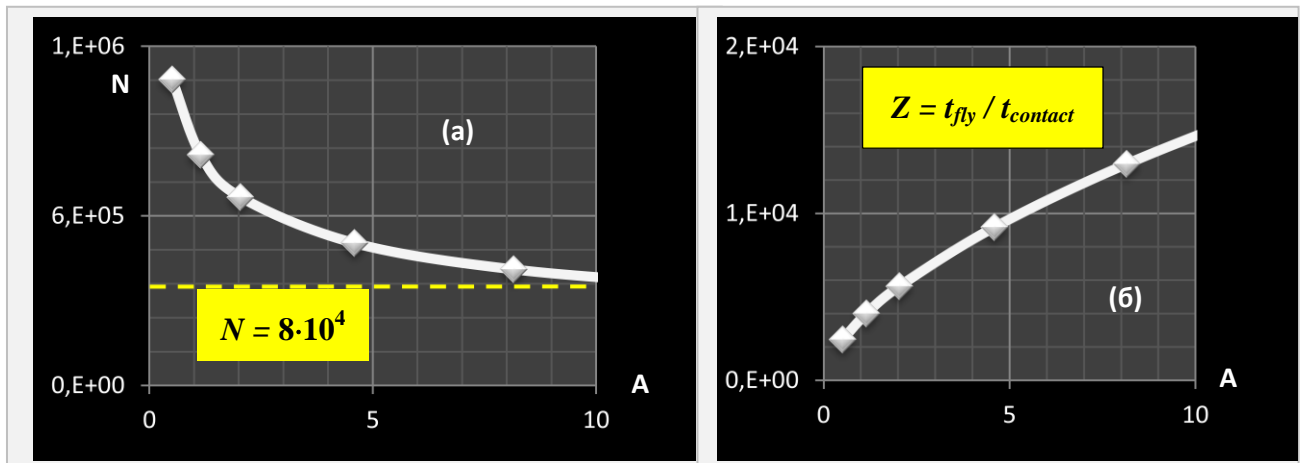


Рис. 7. Параметры формирования 1-мм реперной КТМ в зависимости от относительной амплитуды  $A$ . На графиках: (а) количество соударений, требующихся для формирования КТМ, (б) отношение времени полета к времени нахождения КТМ в контакте с подложкой.

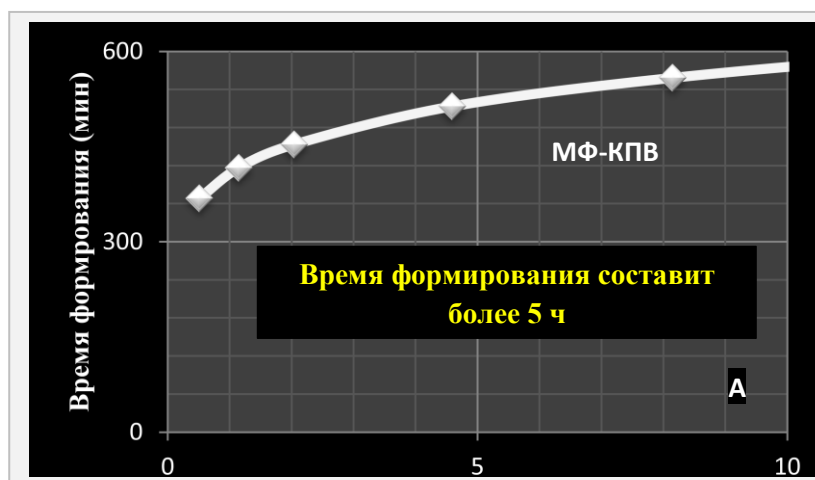


Рис.8. Время формирования 1-мм реперной КТМ в зависимости от относительной амплитуды  $A$ .

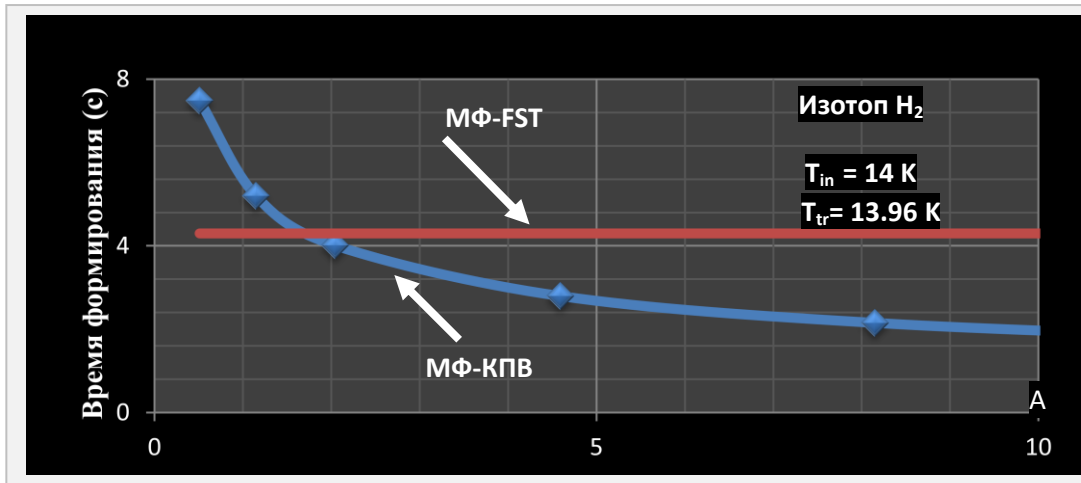


Рис. 9. Время формирования 1-мм реперной КТМ в МФ-КПВ (исключено «мертвое время» для моды отражения в фазе полета КТМ между последовательными соударениями).

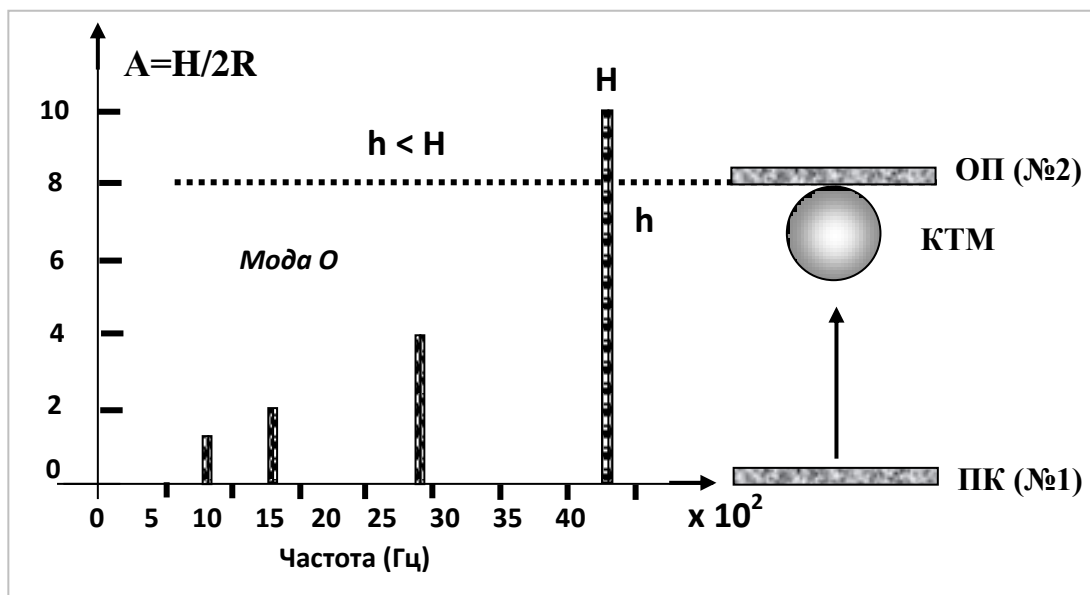


Рис. 10. Ограничение амплитуды  $A$  при использовании в МФ-КПВ второй отражающей пластины (ОП).

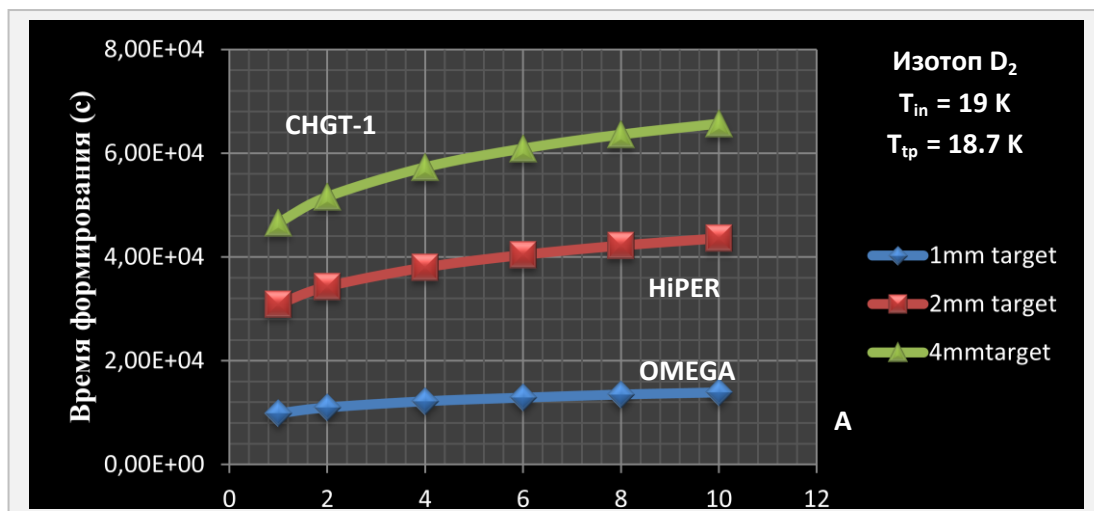


Рис. 11. Время формирования КТМ различного дизайна в МФ-КПВ с одной вибрирующей пластиной.

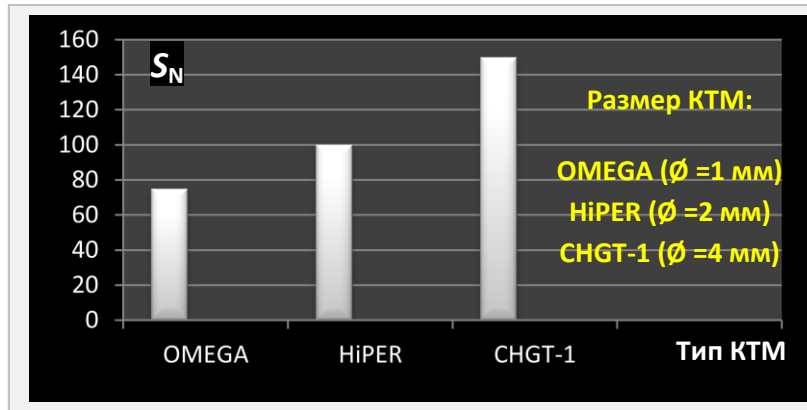


Рис. 12. Отношение суммарной площади пятна контакта к площади поверхности оболочки для различных КТМ.

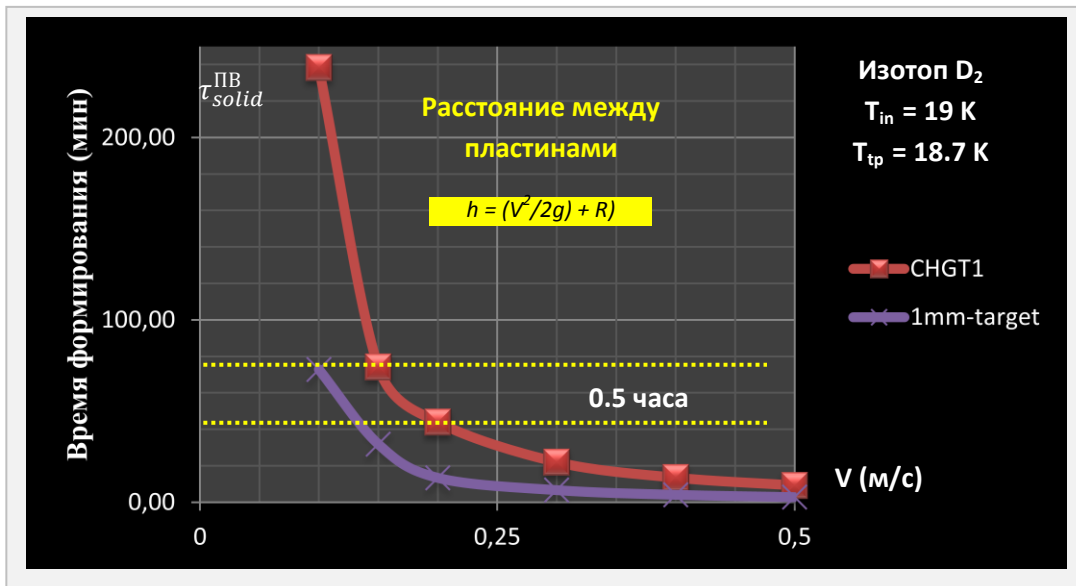


Рис. 13. Время формирования КТМ при различных скоростях отскока  $V$  от рабочих пластин, находящихся на расстоянии  $h = (V^2 / 2g) + R$  друг от друга.

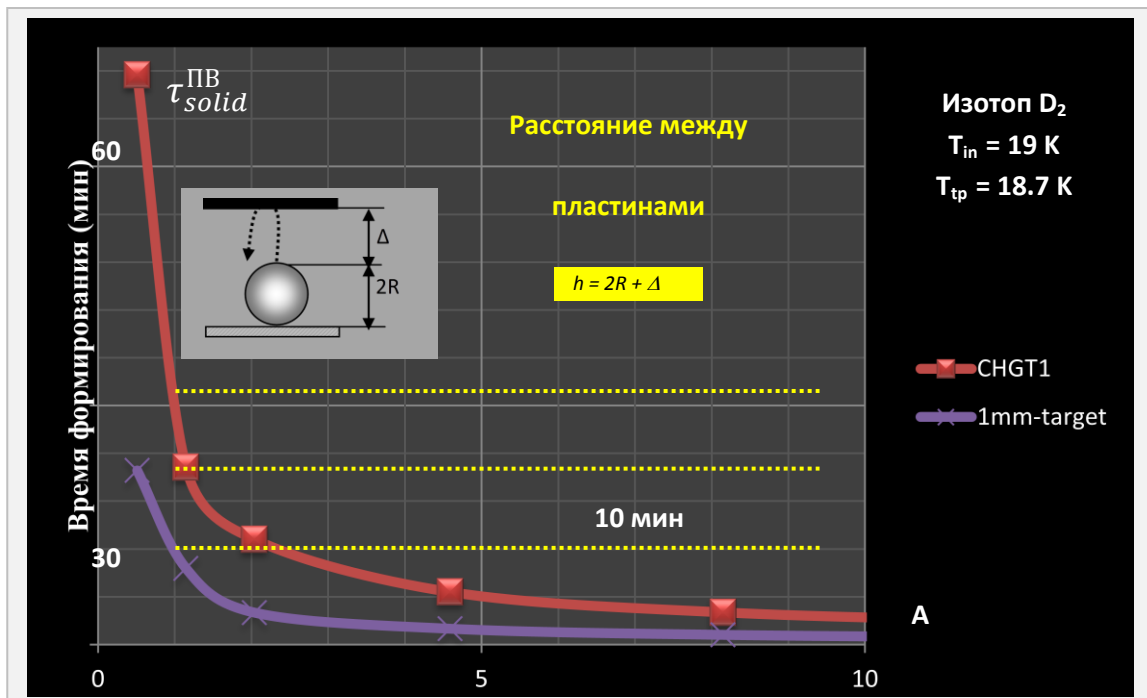


Рис. 14. Индивидуальная оптимизация: время формирования КТМ в зависимости от параметра  $A$  для случая двух вибрирующих пластин, находящихся на расстоянии  $h = 2R + \Delta$ .

## II. КОНЦЕПЦИЯ ИНЖЕКТОРА С СИСТЕМОЙ КОРРЕКЦИИ ТРАЕКТОРИИ САБОТА НА ОСНОВЕ ЭФФЕКТА КВАНТОВОЙ ЛЕВИТАЦИИ ВТСП

Одной из важнейших задач в общей программе лазерного термоядерного синтеза (ЛТС) является создание системы частотной доставки (инжектора) бесподвесных криогенных топливных мишеней (КТМ) в зону термоядерного горения реактора [1–5]. Особенность процесса доставки заключается в требованиях на частотность доставки ( $\sim 10$  Гц), точность доставки ( $\pm 20$  мкм) и температурный режим доставки. Сферическая КТМ должна иметь в момент облучения лазером температуру не выше 18.3 К. При этом температура стенки самой реакторной камеры может достигать значительных величин (для камеры реактора SOMBRERO указанная величина составляет 1758 К [4, 5]), а перегрузки на КТМ при ее ускорении в инжекторе могут составлять от 500 g до 1000 g. Поэтому ускорение КТМ осуществляется в специальной капсуле-носителе – саботе, который передает импульс движения на мишень при ее ускорении до требуемой скорости инъекции (200–400 м/с).

Выбор типа ускорителя КТМ – одна из ключевых проблем при практической реализации этих требований. Существует несколько способов ускорения малых тел (на данный момент размер реакторной КТМ не превосходит 4 мм [1]). Поэтому в ведущих лабораториях мира изучаются различные подходы для ускорения и инъекции КТМ. Среди них – пневматические и электромагнитные пушки, электростатические и гравитационные инжекторы, а также системы с использованием явления магнитной левитации (МАГЛЕВ).

Вне зависимости от выбранного типа ускорителя КТМ, существует еще одна проблема, связанная с тем, что при ускорении КТМ выделяется тепло вследствие трения сабота о стенку направляющей трубки инжектора, что может привести к потере качества топливного слоя. Согласно [6], максимальное изменение температуры ДТ-топлива не должно превышать  $\sim 100$  мК. Кроме того, существует риск нарушения работы инжектора вследствие расклинивания сабота в направляющей трубке [7].

Чтобы исключить этот источник теплового разрушения топливного слоя и снизить риски при работе инжектора, в данном проекте нами было предложено использовать в качестве носителя КТМ сабот из сверхпроводящего материала, а в систему инъекции включить такой элемент, как направляющий рельс, изготовленный из постоянного магнита. Это позволит исключить касание сабота с направляющей трубкой инжектора [8–11]. Таким образом, создание системы бесконтактного позиционирования и транспорта КТМ представляет собой одну из важнейших задач в общей программе ЛТС.

Исследовательская разработка ФИАН включает следующие два основных направления по созданию гибридных систем бесконтактной доставки КТМ:

- Гравитационный инжектор + ВТСП-МАГЛЕВ системы
- Электромагнитный (ЭМ) инжектор + ВТСП-МАГЛЕВ системы

При решении задач третьего года проекта получено следующее:

- Успешно проведена новая серия экспериментов с использованием ленточных ВТСП типа СуперОкс J-PI-12-20Ag-20Cu (аббревиатура Gd123) при разработке капсул-носителей (саботов) для криогенных систем бесконтактной доставки КТМ.
- Получены первые результаты, связанные с практической возможностью осуществить ускорение объекта «КТМ + ВТСП сабот» при различных запускающих импульсах (механических, электромагнитных) или под действием сил гравитации.

— Выполнено моделирование и осуществлен расчет основных параметров электромагнитного ускорителя типа «ЭМ-инжектор + ВТСП-МАГЛЕВ системы» для различных сверхпроводящих материалов.

Полученные результаты положены в основу концепции инжектора с системой коррекции траектории сабота (носителя КТМ), работающей на основе эффекта квантовой левитации ВТСП.

Основные результаты представлены ниже.

## 1. РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ, ПОЛОЖЕННЫХ В ОСНОВУ КОНЦЕПЦИИ

В данном разделе даны результаты сравнительных экспериментов, исследовавших движение над магнитными рельсами ВТСП носителей КТМ (саботов) различной геометрии под действием импульсов различной природы – механических и электромагнитных, а также под действием гравитации. Эксперименты проведены при температуре 80 К.

### 1.1. ВТСП сабот типа «открытый параллелепипед» или «корыто» (модель с3)

На Рис. 1 показан ВТСП сабот типа «открытый параллелепипед» или «корыто» (модель с3), движущийся над магнитным рельсом под действием гравитации. Внутри сабота расположен массив полимерных оболочек диаметром 2 мм.

Параметры сабота: материал – ВТСП лента на основе Gd123 (ООО СуперОкс), длина 24 мм, ширина (внутри) 8 мм, высота 4 мм, толщина стенки 0.5 мм, вес 1.25 г.

На Рис. 2 дана покадровая развертка движения сабота под действием механического импульса.

На Рис. 3 дана покадровая развертка движения сабота под действием электромагнитного импульса. Параметры эксперимента следующие:

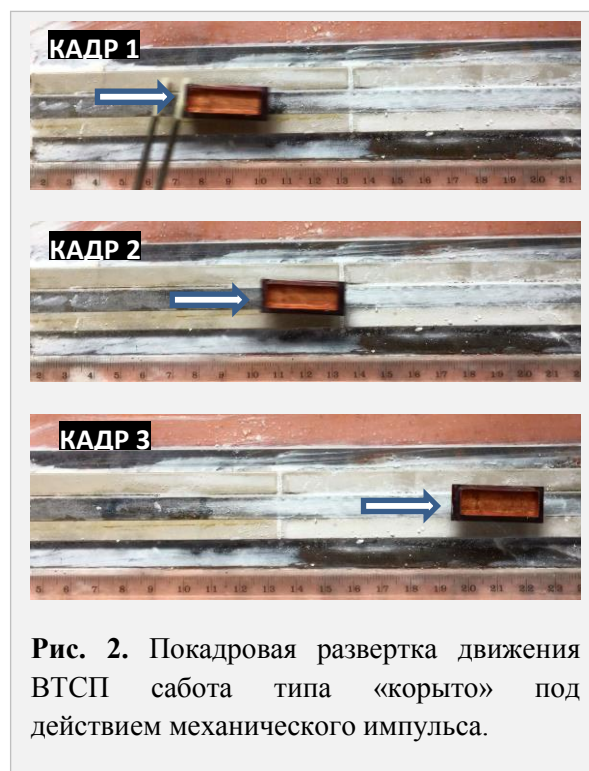
Запускающий соленоид – 98 витков, длительность импульса 1 мс, амплитуда тока 200 А, импульс магнитного поля  $B_{\text{макс}} = 0.35$  Тл

Магнитный рельс – длина 24 см, выполнен на основе постоянных неодимовых магнитов,  $B_{\text{макс}} = 0.33$  Тл

Магнитный тормоз - постоянный неодимовый магнит  $B = 0.4$  Тл (ООО Мидора).

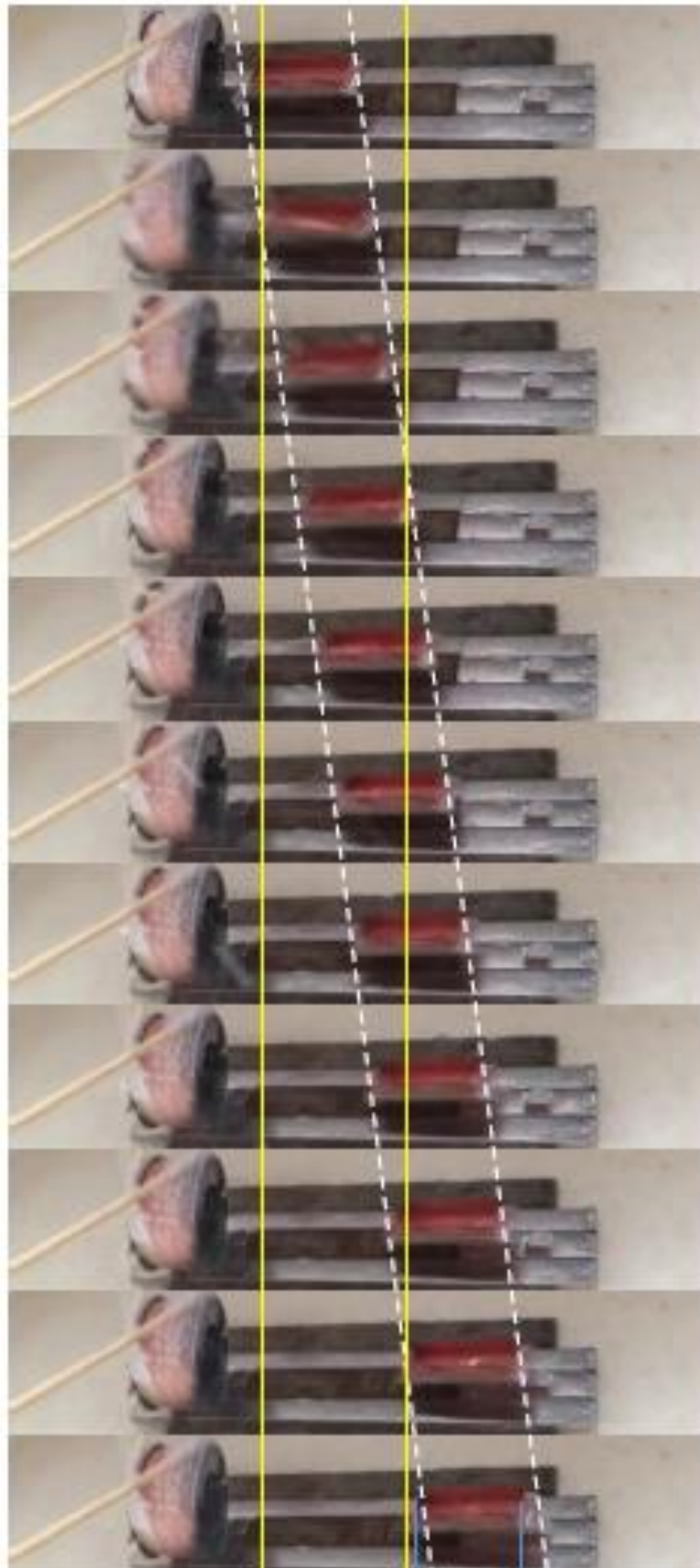


**Рис. 1.** Движение ВТСП сабота типа «корыто» с массивом сферических оболочек (диам. 2 мм) над магнитным рельсом под действием гравитации.

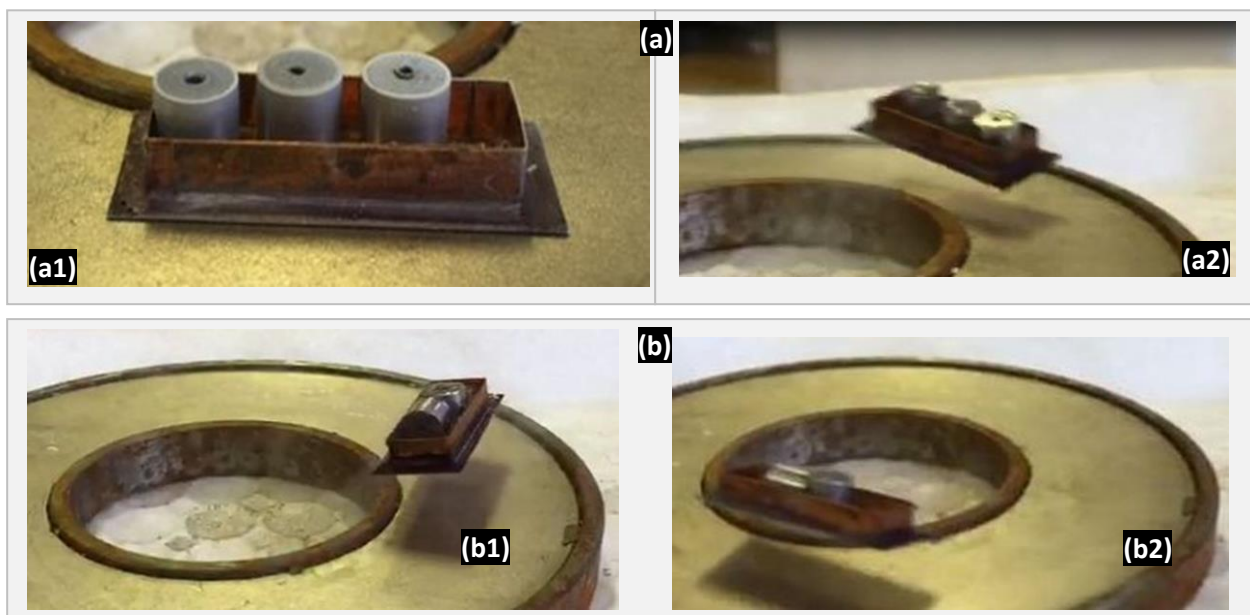


**Рис. 2.** Покадровая развертка движения ВТСП сабота типа «корыто» под действием механического импульса.

Действие электромагнитного импульса на ВТСП сабот типа «корыто» иллюстрирует Рис. 3.



**Рис. 3.** Покадровая развертка движения ВТСП сабота типа «корыто» под действием электромагнитного импульса; расчетная скорость движения 12.8 см/с. Параметры соленоида:  $N = 98$  витков, длительность импульса 1 мс, амплитуда тока 200 А, максимальное поле в импульсе  $B_{\text{макс}} = 0.35$  Тл



**Рис. 4.** Циклическое движение ВТСП сабота типа «корыто», нагруженного свинцовыми цилиндрами общим весом 3.3 г в магнитном поле кольцевого рельса (магнитная система PMG-5); температура  $T = 80$  К. (а): 3 цилиндрических образца из свинца размещаются вертикально внутри Gd123-сабота (a1 – до эксперимента при  $T > T_c = 92$  К, a2 – в процессе левитации при  $T = 80$  К (движение начинается под действием гравитации); (б): 2 свинцовых цилиндра размещаются в том же саботе – один вертикально, а другой горизонтально; (b1 – движение инициируется механическим импульсом, b2 – круговое движение над магнитным рельсом).

## 1.2. ВТСП сабот типа «параллелепипед с ребрами» (модель с5)

Данная модель выполнена в виде полого параллелепипеда с надетыми на него ребрами; все элементы выполнены на основе ленты СуперОкс, в основу которой положен сверхпроводник Gd123; число ребер – 5, размер каждого ребра 12x12 мм, внутреннее отверстие ребра 4x4 мм; размеры параллелепипеда 4x4x30 мм; толщина стенки 0.3 мм; общий вес сабота 1.26 г.

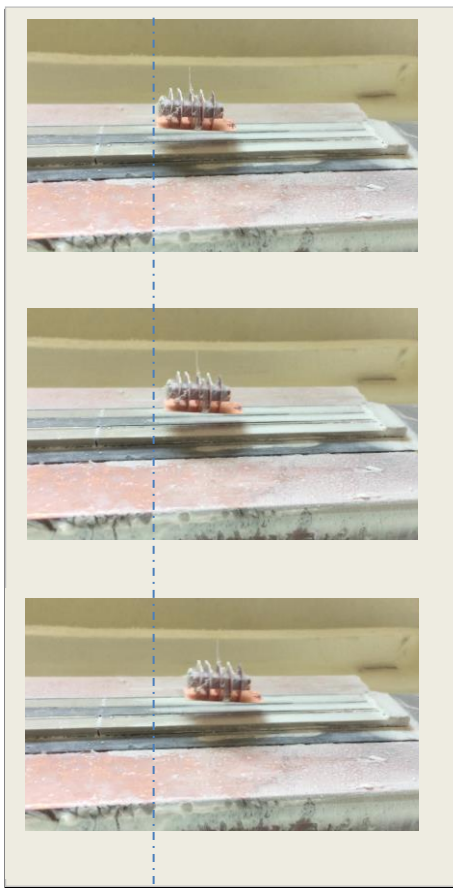
На Рис. 5 показано размещение сабота модели с5 над магнитным рельсом (магнитная система PMG-3) перед запускающим соленоидом. Эксперименты проведены при температуре  $T = 80$  К. Привести в движение данную модель под действием электромагнитного импульса не удалось. Параметры запускающего соленоида те же, что и в экспериментах с моделью с3.



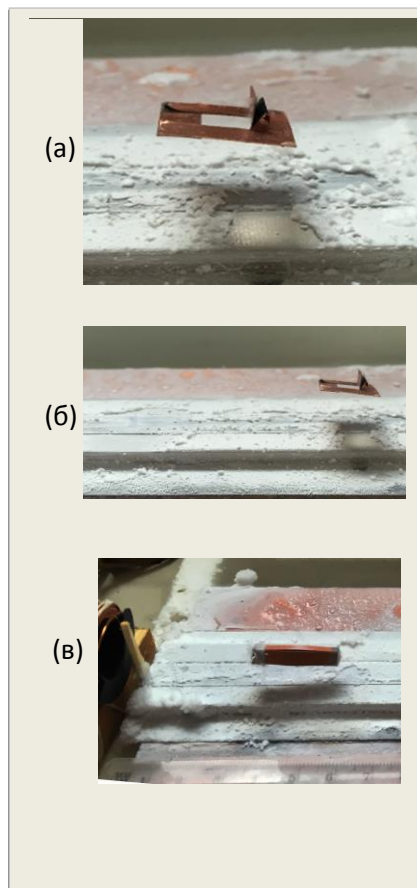
**Рис. 5.** Реализовать движение ВТСП сабота (модель с5) под действием импульса магнитного поля не удалось

На Рис. 6 показано движение модели с5, расположенной на ВТСП подложке, под действием гравитации. На Рис. 7 показана левитация составных частей модели с5 над магнитным рельсом.





**Рис. 6.** Движение сабота с5 с ВТСП подложкой над магнитным рельсом под действием гравитации



**Рис. 7.** Левитация отдельных ребер (а, б) и внутренней части (в) сабота с5 над магнитным рельсом

### 1.3. ВТСП сабот типа «параллелепипед» (модель с6)

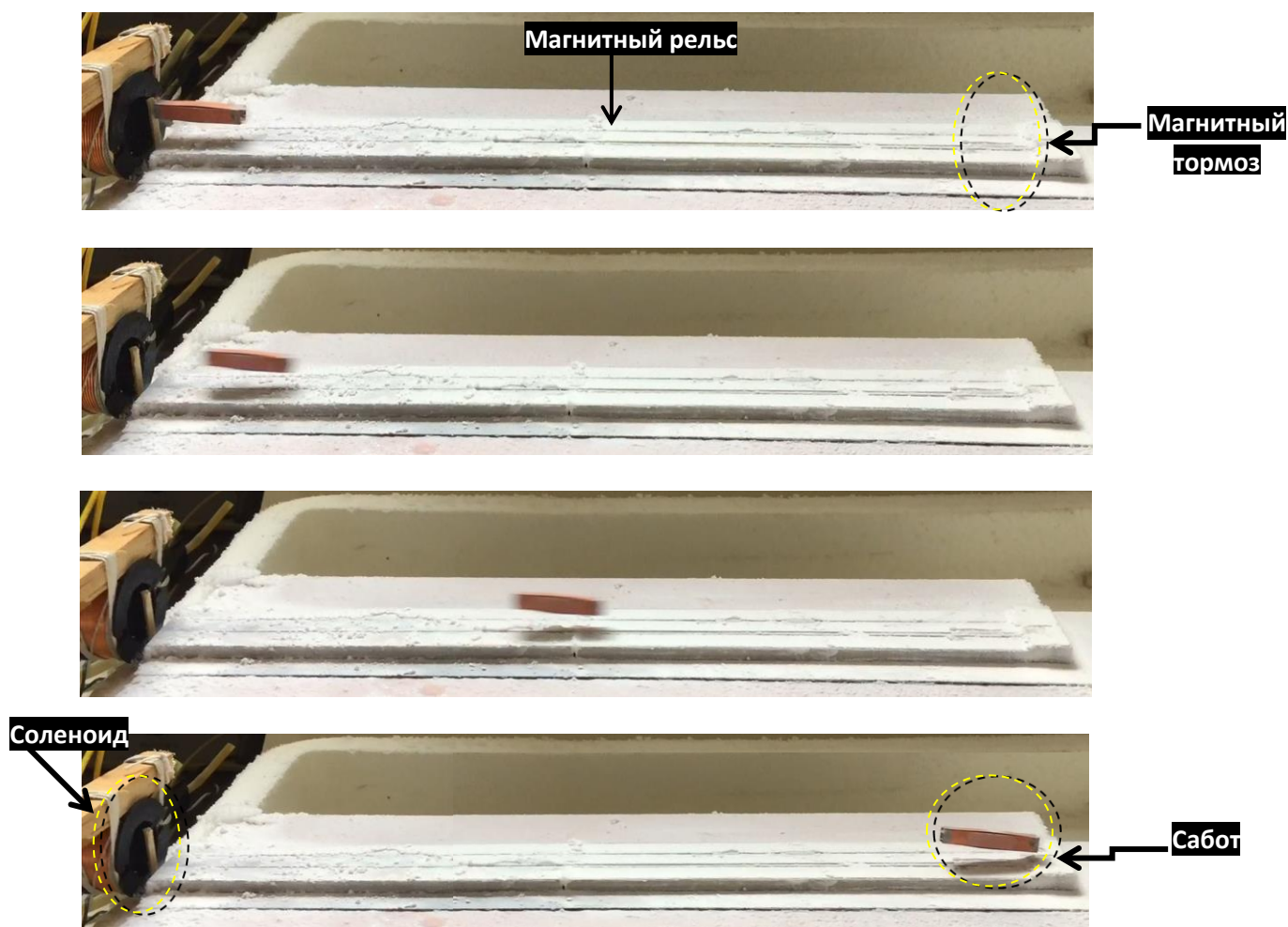
Данная модель ВТСП сабота выполнена в виде полого параллелепипеда с размерами 4x4x30 мм, толщина стенки 0.3 мм, вес 586 мг, вес внутренней нагрузки 386 мг; материал сабота – ВТСП лента производства ООО СуперОкс на основе сверхпроводника Gd123, критическая температура  $T_c = 91$  К. На Рис. 8 – 10 показаны, последовательно, движение сабота под действием гравитации, механического импульса и электромагнитного импульса.



**Рис. 8.** Движение модели с6 над магнитным рельсом под действием гравитации.



**Рис. 9.** Экспериментальное доказательство ускорения ВТСП сабота (модель с6) при круговом движении над магнитным рельсом под действием запускающего механического импульса.



**Рис. 10.** Экспериментальная демонстрация линейного ускорения ВТСП сабота над магнитным рельсом под действием запускающего электромагнитного импульса:

- Магнитный тормоз: неодимовый магнит,  $B_{\text{макс}} = 0.4$  Тл,
- Магнитный рельс: длина 24 см, выполнен на основе неодимовых магнитов,  $B_{\text{макс}} = 0.33$  Тл,
- Запускающая катушка: 98 витков, длительность импульса 1 мс, амплитуда тока 200 А, максимальное значение магнитного поля в импульсе  $B_{\text{макс}} = 0.35$  Тл.

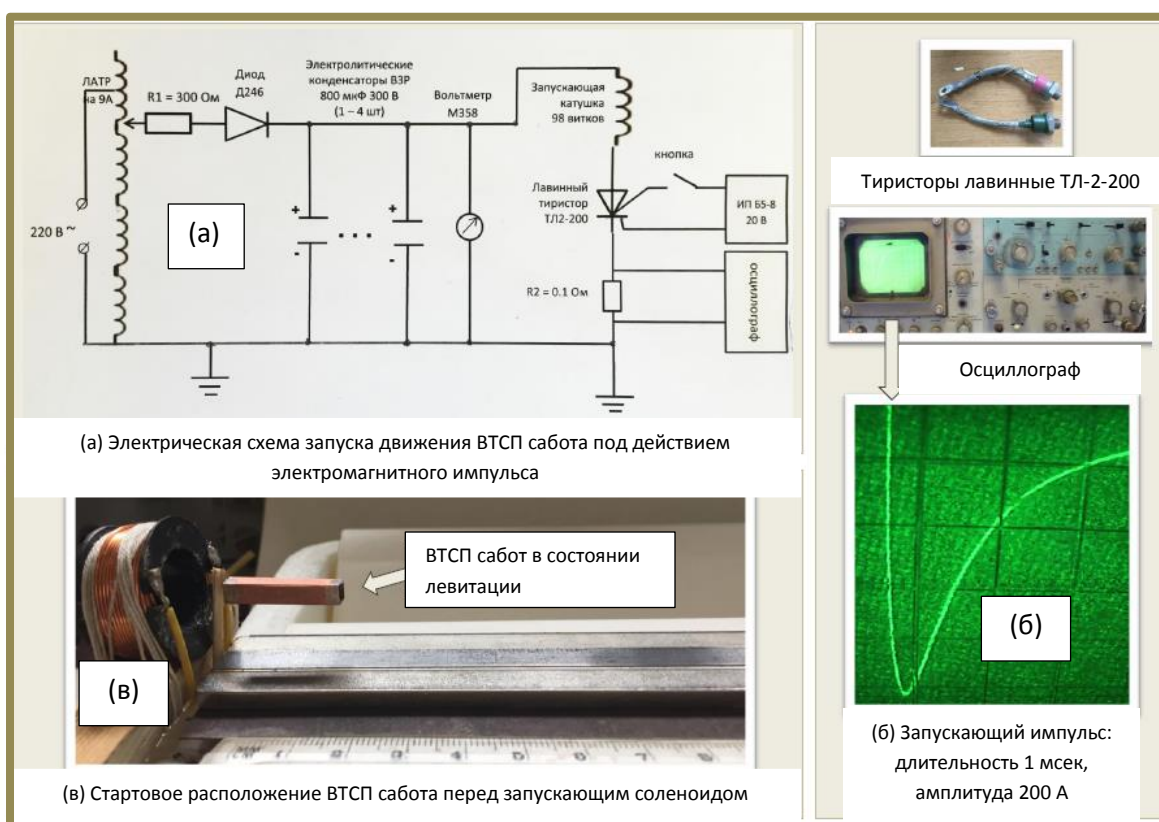
#### ■ Основные выводы:

1. Исследованы условия ускорения ВТСП сабота различной геометрии при различном ускоряющем воздействии, в том числе: гравитация, механический и электромагнитный импульс.
2. В экспериментах использованы ВТСП саботы в следующей геометрии: тип «открытый параллелепипед» или «корыто» (модель с3), тип «параллелепипед» (модель с6) и тип «параллелепипед с ребрами» (модель с5).
3. В экспериментах использованы два типа магнитных рельсов, изготовленных в 2015 г. в рамках текущего проекта РФФИ [22] на основе неодимовых постоянных магнитов (поставка – фирма МИДОРА)
4. Во всех экспериментах ВТСП сабот находился в состоянии левитации над магнитным рельсом, как на стартовой позиции, так и в процессе движения. Этот прием, впервые, позволил избежать тепловыделения за счет трения сабота о стенку ускорителя, а значит повысить эффективность ускоряющего воздействия.
5. При использовании гравитационного воздействия получены следующие результаты:

- форма ВТСП сабота не влияет на результаты разгона;
- использование явления левитации ВТСП над магнитным рельсом позволяет расширить допустимую область размещения гравитационного инжектора на камере установки ИТС: от  $15-90^{\circ}$  (при трении сабота о стенку инжектора) до  $1-90^{\circ}$  (при бесконтактной левитации сабота);
- продемонстрирована возможность разгона ВТСП сабота с массивом сферических оболочек, а также с массивом (до 3-х штук) свинцовых цилиндрических объектов.

6. При использовании механического запускающего импульса получены следующие результаты:

- продемонстрирована возможность кругового движения ВТСП саботов моделей с3 и с6;
- продемонстрирована возможность кругового транспорта массива цилиндрических или сферических мишеней с помощью ВТСП сабота модели с3;
- продемонстрирована возможность линейного транспорта ВТСП сабота типа «параллелепипед» (модель с6).



**Рис. 11.** Схема запуска импульса тока через соленоид (а), форма импульса (б) и стартовое расположение ВТСП сабота модели с6 перед запускающим соленоидом (в).

7. При использовании электромагнитного запускающего импульса получены следующие результаты (схема запуска импульса тока через соленоид показана на Рис.11):

- при использовании одинаковых запускающих импульсов наилучшие результаты разгона (при одинаковых условиях эксперимента) были получены для ВТСП сабота типа «параллелепипед» (модель с6);
- ВТСП сабот в форме «параллелепипед с ребрами» не приходит в движение под действием электромагнитного запускающего импульса.

## 2. ПРИНЦИП ПОСТРОЕНИЯ БЕСКОНТАКТНОЙ СИСТЕМЫ УСКОРЕНИЯ

Кратко остановимся на принципе построения бесконтактной системы доставки КТМ с использованием ВТСП-элементов. Система включает три основных части (см. Рис. 12 и 13):

— **Сверхпроводящий сабот**, включающий в свой состав (а) ускоряемый ВТСП-элемент в виде колец или витков с током, который индуцируется в сверхпроводнике под действием магнитного поля соленоида («driving body»), (б) левитирующий ВТСП-элемент в виде пластин, и (в) полимерную матрицу со специальным гнездом для размещения КТМ.

— **Магнитный рельс**, входящий в PMG (**p**ermanent **m**agnet **g**uideway) систему (Рис. 12), которая используется для левитации и стабилизации траектории сабота за счет наличия ВТСП-пластин (составная часть сабота, Рис. 13),

— **Система ускорения**, состоящая из коротких соленоидов для генерации бегущей магнитной волны. Каждый соленоид может быть выполнен из ВТСП-провода.

Подчеркнем, что наличие магнитного рельса (Рис. 12) для формирования полей различной конфигурации, а также ВТСП-пластин как составной части сабота (Рис. 13), дает возможность построить систему бесконтактной доставки КТМ, когда сабот будет ускоряться вдоль направляющей трубки инжектора без контакта с её стенками [8–11]. Именно это отличает подход ФИАН от других разработок, в которых сверхпроводник рассматривается только как ускоряющий элемент, что не позволяет избежать трения при ускорении ансамбля «КТМ + САБОТ» [12–16].

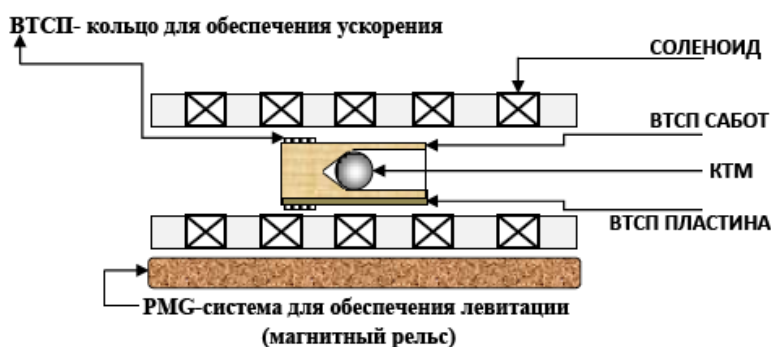


Рис. 12. Бесконтактная система доставки с использованием ВТСП-элементов и PMG системы.

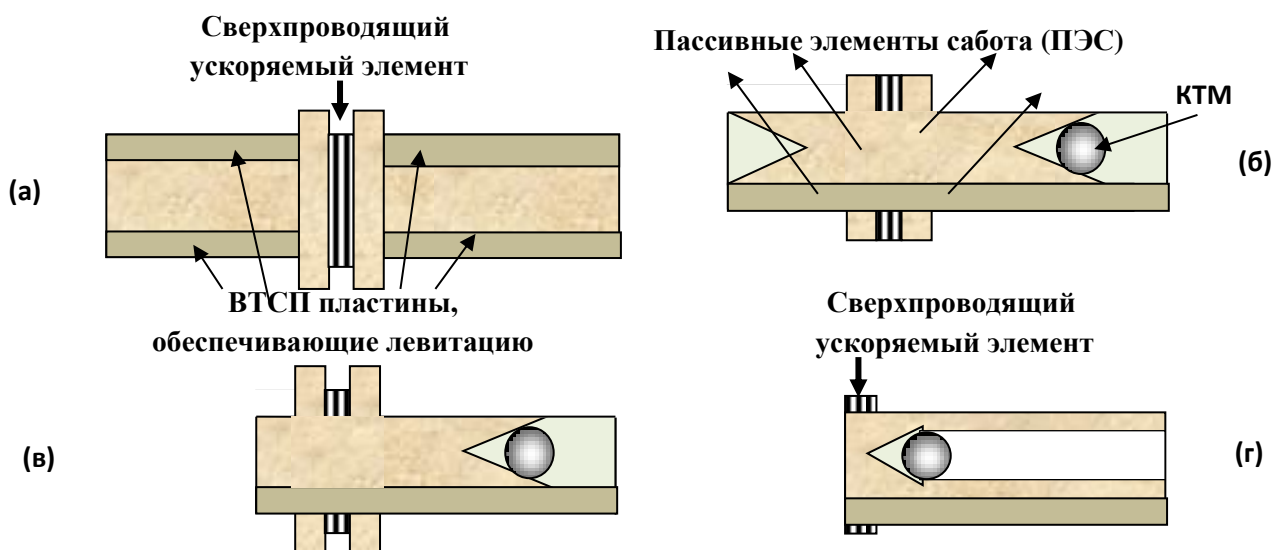


Рис. 13. Схемы возможных конструкций сабота с ускоряемым ВТСП-элементом и левитирующими ВТСП-пластинами (ПЭС – пассивный элемент сабота, собственно матрица или основа для сборки других элементов сабота). Экспериментально показано, что последний вариант (г) наиболее перспективен для решения поставленной задачи. На рисунке: (а) – вид сбоку, (б)–(г) – осевое сечение, на котором видно размещение КТМ в специальном мишенном гнезде, а также технологическое углубление на заднем торце сабота.

### 3. РАСЧЕТ ОСНОВНЫХ ПАРАМЕТРОВ БЕСКОНТАКТНОЙ СИСТЕМЫ УСКОРЕНИЯ

Теперь перейдем непосредственно к расчету основных параметров системы ускорения КТМ типа «ЭМ-ИНЖЕКТОР + ВТСП-МАГЛЕВ СИСТЕМЫ».

Для определения важнейших из них – длины ускорения – необходимо знать градиент магнитного поля на всей длине ускорения. Образование магнитного потока в соленоиде показано на Рис. 14.

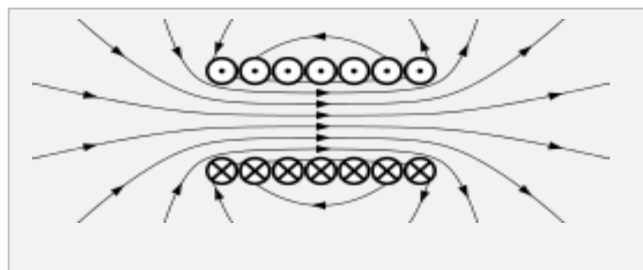


Рис. 14. Иллюстрации к распределению магнитного поля в длинном соленоиде.

В центре по длине на оси такого соленоида магнитное поле практически однородно. На краях конечного, но достаточно длинного соленоида поле вдвое меньше, чем в центре. Поэтому для получения значительных градиентов магнитного поля перспективно использование коротких катушек с небольшим числом витков. Начнем с анализа магнитного поля одного витка с током.

#### 3.1. Поле витка с током

Рассмотрим поле, создаваемое током  $I$ , текущим по тонкому проводу, имеющему форму окружности радиуса  $r_f$  (Рис. 15).

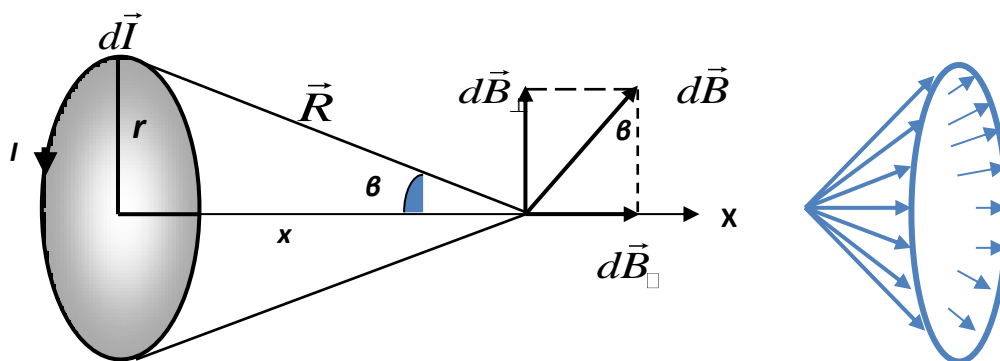


Рис. 15. К определению магнитной индукции на расстоянии  $x$  от плоскости кругового тока.

Определим магнитную индукцию на оси симметрии на расстоянии  $x$  от плоскости кругового тока (витка с током). Векторы  $d\vec{B}$  перпендикулярны плоскостям, проходящим через соответствующие векторы  $d\vec{I}$  и  $\vec{R}$ . Следовательно, они образуют симметричный конический веер. Из соображения симметрии видно, что результирующий вектор будет направлен вдоль оси

кругового тока. Каждый из векторов  $d\vec{B}$  вносит вклад равный  $d\vec{B}_{\square}$ , а  $d\vec{B}_{\perp}$  взаимно уничтожаются. Но величину вектора  $d\vec{B}_{\square}$  легко найти

$$dB_{\square} = dB \sin \beta = dB \frac{r}{R} = \frac{\mu_0}{4\pi} \cdot \frac{Idl}{R^2} \cdot \frac{r}{R}, \quad (1)$$

$$R = \sqrt{r^2 + x^2}. \quad (2)$$

Подставив в (1) выражение (2) и, проинтегрировав по всему контуру  $l = 2\pi r$ , получим выражение для нахождения магнитной индукции кругового тока:

$$B = \frac{\mu_0}{4\pi} \cdot \frac{2\pi r^2 I}{(r^2 + x^2)^{3/2}}. \quad (3)$$

■ При  $x = 0$  получим магнитную индукцию в центре кругового тока

$$B_0 = \frac{\mu_0 I}{2r}. \quad (4)$$

■ При  $r \ll x$ , т.е. на большом расстоянии от контура, магнитную индукцию можно рассчитать по формуле:

$$B = \frac{\mu_0 P_m}{2\pi x^3}, \quad (5)$$

где  $P_m = I\pi r^2 = I \cdot S$  – магнитный момент контура. Силовые линии магнитного поля кругового тока показаны на Рис. 16.

■ При  $x = r$ , т.е. на расстоянии от контура, равном радиусу витка, магнитную индукцию можно рассчитать по формуле:

$$B(x) / B_0 = \left[ 1 + \frac{x^2}{r^2} \right]^{-3/2}, \quad B_0 = \frac{\mu_0 I}{2r}. \quad (6)$$

Другими словами, при  $x / r_f = 1$ ,  $B(r) / B_0 = 2^{-3/2}$ , т.е.  $B(r) \approx B_0 / 2.83$

■ Тогда для интервала по оси  $x \rightarrow 0 \leq |x| \leq r$  величину градиента магнитного поля можно оценить следующим

$$|\partial_x B| = 0.65 \frac{B_0}{r}. \quad (7)$$



■ **Основные выводы:**

— При  $x = r$  можно получить значительный градиент магнитного поля для ускорения КТМ, расположенной внутри сабота (см. Рис. 12 и 13).

— Ускоритель рассматривается как система круговых токов, расположенных на расстоянии  $r$  друг от друга.

— При этом градиент магнитного поля, в среднем, не убывает на всей длине ускорения и может быть аппроксимирован величиной  $\partial_x B = \eta \frac{B_0}{r}$ , где  $\eta = 0.65$

**3.2. Расчет длины ускорения**

Введем следующие обозначения:

■ **Ускоряющая сила**

$$F = P_{ms} \cdot \partial_x B$$

$P_{ms}$  – магнитный момент «driving body»,

$B$  – индукция ускоряющего внешнего поля

$\partial_x B$  – градиент  $B$

■ **Магнитный момент  $P_{ms}$ , который создается сверхпроводящим витком с током**

$$P_{ms} = \pi r_s^2 I_s, \text{ или}$$

$$P_{ms} = \frac{M_s r_s J_s}{2 \rho_s}$$

$r_s$  – радиус сверхпроводящего витка с током

$I_s$  – наведенный индукционный ток в витке

$J_s$  – плотность наведенного тока

$\rho_s$  – плотность сверхпроводящего материала

$M_s$  – масса сверхпроводящего витка с током

■ **Ускорение сабота**

$$a = F / M_{sab}, \text{ или}$$

$$a = \frac{M_s r_s J_s}{2 M_{sab} \rho_s} \cdot \partial_x B$$

$M_{sab}$  – полная масса ансамбля «САБОТ + КТМ»

$M_{sab} = M_s + M_p + M_t + M_l$ , где

$M_s$  – масса ускоряющего элемента

$M_p$  – масса пассивного элемента

$M_t$  – масса КТМ

$M_l$  – масса лев. элемента (лев. пластин)

■ **Длина ускорения**

$$L_a = \frac{V^2}{2a}, \text{ или}$$

$$L_a = V^2 \cdot \frac{M_{sab}}{M_s} \cdot \frac{\rho_s}{r_s J_s \partial_x B}$$

$V$  – скорость, которую необходимо достичь при ускорении мишени

$a$  – ускорение ансамбля «САБОТ + КТМ» для данного дизайна ускорителя

Отметим, что с точки зрения использования сверхпроводящего ускоряющего элемента в виде витка с током, важным является величина плотности тока,  $J_s$ , которая индуцируется в

сверхпроводнике под действием магнитного поля соленоида. Её максимальное значение равно плотности критического тока  $j_c$ .

Поэтому полученное выражение для  $L_a$  переписем в виде, удобном для дальнейшего анализа:

$$L_a = V^2 \cdot \frac{M_{sab}}{M_s} \cdot \frac{r}{r_s} \cdot \frac{\rho_s}{j_c \cdot B_0} \cdot \frac{1}{\eta}, \quad (8)$$

где  $j_c(B_0, T_s)$  – плотность критического тока, величина которого зависит от индукции внешнего магнитного поля и температуры сверхпроводника.

Отметим, что произведение

$$F_{pin} = j_c(B_0, T_s) \cdot B_0 \quad (9)$$

представляет собой плотность силы пиннинга для материала, используемого в витке с током. Тогда выражение для длины ускорения (8) можно записать в более компактном виде

$$L_a = \frac{\pi}{2} \cdot \frac{r}{r_s} \cdot \frac{M_{sab} V_s^2}{F_{pin} V_s}, \quad (10)$$

где  $V_s$  – объем материала используемого сверхпроводника.

Прежде чем перейти к оценкам, сделаем следующее важное замечание. Явление сверхпроводимости используется для получения сильных магнитных полей (например, в циклотронах, при строительстве реактора в проекте Международный Термоядерный Экспериментальный Реактор (ИТЭР), и др.), поскольку при прохождении по сверхпроводнику сильных токов, создающих сильные магнитные поля, отсутствуют тепловые потери. Однако в связи с тем, что магнитное поле разрушает состояние сверхпроводимости, для получения сильных магнитных полей применяются т.н. сверхпроводники II рода, в которых возможно сосуществование сверхпроводимости и магнитного поля. В таких сверхпроводниках магнитное поле вызывает появление тонких нитей нормального металла, пронизывающих образец, каждая из которых несёт квант магнитного потока (вихри Абрикосова). Вещество же между нитями остаётся сверхпроводящим. Поскольку в сверхпроводнике II рода нет полного эффекта Мейснера, сверхпроводимость существует до гораздо больших значений критического магнитного поля. В технике применяются, в основном, следующие сверхпроводники (Таблица 1):

**Таблица 1.** Сильноточные сверхпроводники II рода.

Соединение	$T_c$ , К	$j_c$ , А/см <sup>2</sup> (Тл), при 4.2 К	$B_c$ , Тл (Т, К)
NbTi	9.5–10.5	$(38) \cdot 10^4$ (5)	12.5–16,5 (1.2) 12 (4.2)
Nb <sub>3</sub> Sn	18.1–18.5	$(1-8) \cdot 10^5$ (0)	24.5–28 (0)
NbN	14.5–17.8	$(2-5) \cdot 10^7$ (18)	25 (1.2) 8–13 (4.2)

Будем использовать NbTi в качестве реперной точки, имея в виду, что производство данного сверхпроводящего материала хорошо развито в России [17]. Для проведения расчетов надо знать величины параметров, входящих в формулу (10). Значения критического тока, которые



зависят от индукции внешнего магнитного поля и температуры сверхпроводника, для NbTi известны (Рис. 17) [17, 18].

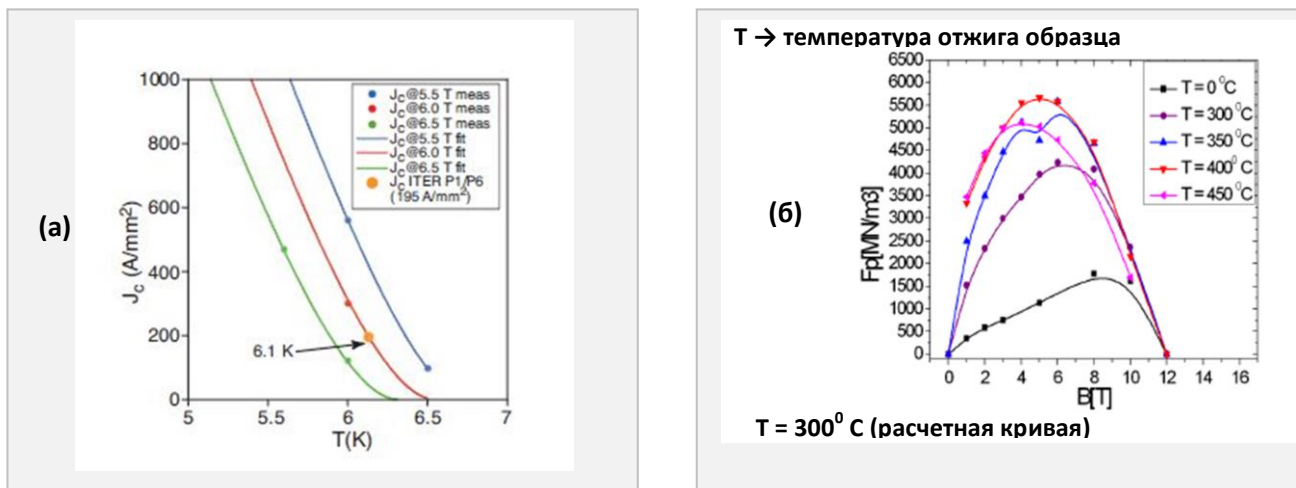


Рис. 17. Критический ток как функция температуры для различных магнитных полей (а) [17] и расчетное значение силы пиннинга при  $T_s = 4.2$  (б) [18].

Результаты расчетов представлены на Рис. 18 (Рис. 18а отслеживает расчетную кривую на Рис. 17б). Видно, что значение минимальной длины ускорения составляет  $L_a = 2.8$  м (Рис. 18а).

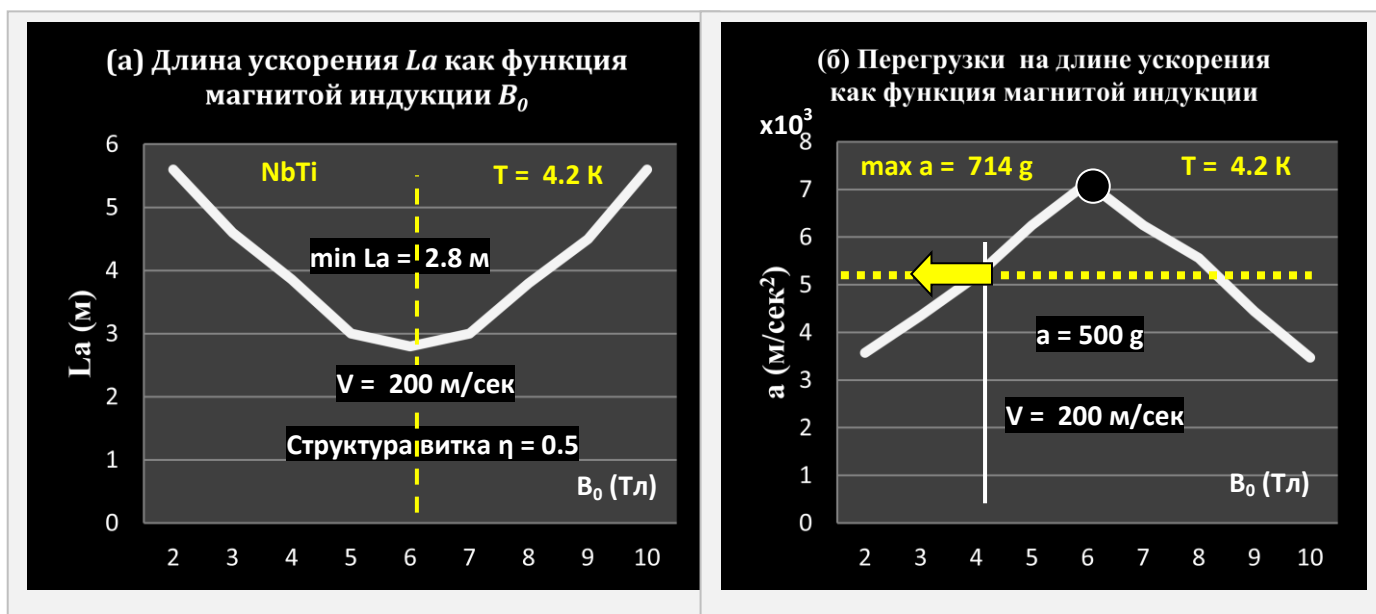


Рис. 18. Параметры ускорения КТМ для сверхпроводящего витка с током из NbTi при  $T = 4.2$  К.

Желательно, однако, чтобы перегрузки на длине ускорения  $L_a$  не превышали 500 g, чтобы снизить возникающие механические напряжения, возникающие в материале КТМ. Тогда рабочий интервал для величины  $L_a$  будет ограничен соотношением  $L_a > 4$  м (Рис. 18,б). Кроме того, он реализуется при меньших значениях индукции ускоряющего магнитного поля.

Следует особо подчеркнуть (см. Отчет по проекту РФФИ № 15-02-02497 за 2016 г. [22]), что традиционный подход к формированию КТМ (кристаллизации от единичной затравки при достаточно медленном охлаждении топлива  $q \sim 3 \cdot 10^{-5}$  К/с, т.е. формирование монокристалла  $\rightarrow$  методы  $\beta$ -layering и IR-redistribution) хотя и позволяет сформировать топливный слой требуемого

качества, однако его существование в исходном варианте ограничено из-за растрескивания монокристалла даже при малом изменении температуры слоя. В связи с этим инжекция таких слоев в камеру реактора должна осуществляться вблизи температуры формирования слоя, т.е. при  $T_{inj}$  не ниже 18 К. Отметим, что для метода FST, предложенного и развитого в ФИАН (а именно: формирование изотропных ультрадисперсных слоев при высоких скоростях охлаждения 1–50 К/с) инжекция КТМ может осуществляться, начиная даже с  $T_{inj} = 4.2$  К.

Это означает, что NbTi с температурой сверхпроводящего перехода  $T_c = 9.5–10.5$  К (Таблица 1) не может применяться для КТМ, сформированных при достаточно медленном охлаждении топлива (методы  $\beta$ -layering и IR-redistribution, применяемые в США и Евросоюзе) [1]. Поэтому мы рассмотрим сверхпроводящие материалы с более высокой температурой перехода:

— *Сверхпроводящий левитирующий элемент* (одна или несколько ВТСП-пластин), например те, что использовались в наших экспериментах (сверхпроводники 2-го рода Y123 или Gd123), и критические параметры которых представлены в Таблице 2.

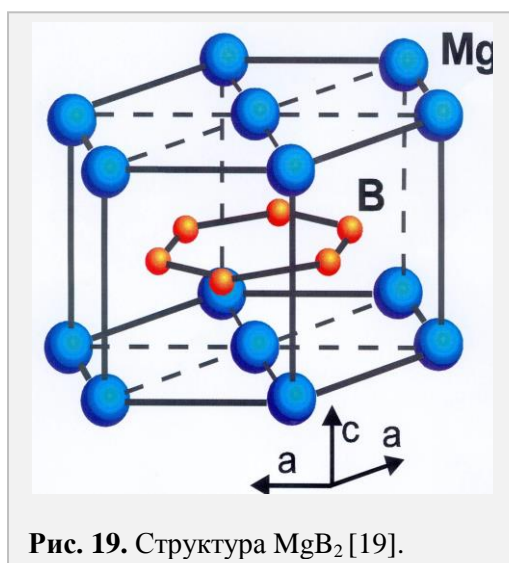
**Таблица 2.** Параметры ВТСП материалов, используемых в проекте.

Тип ВТСП	Критическое поле, $B_c$ at 0 К	Критическая температура, $T_c$
Y123	> 45 Тл	91 К
Gd123	> 45 Тл	92 К

— *Сверхпроводящий ускоряемый элемент* («driving body»)

Рассматривается возможность использования сверхпроводников на основе  $MgB_2$  (Рис. 19). Некоторые исследователи полагают, что диборид магния не укладывается в общепринятую классификацию, а образует совершенно новую категорию сверхпроводников 1.5-го рода, вобравших в себя часть свойств от сверхпроводников 1-го рода и часть от 2-го. Другие ученые не согласны с такой интерпретацией, утверждая, что «необычные» сверхпроводники вполне укладываются в рамки существующего деления на 1-й и 2-й род.

Применение сверхпроводников на основе  $MgB_2$  диктуется следующими его преимуществами [19]:



**Рис. 19.** Структура  $MgB_2$  [19].

- Простой химический состав,
- Дешевизна исходных составляющих для его синтеза,
- Возможность достижения типичных магнитных полей более до 1.5–2.0 Тл при более низких капитальных затратах на оборудование и с более низкой стоимостью эксплуатации,
- Устойчивость характеристик соединения  $MgB_2$  в условиях радиационного воздействия,
- Критическая температура  $MgB_2$  39 К в 2 раза выше, чем у  $Nb_3Sn$ , и в 4 раза выше, чем у Nb-Ti,
- Высокие значения критических транспортных токов и их относительно малая чувствительность к межзёрненным контактам;  $I_c \sim 900$  А ( $T = 4.2$  К,  $B = 0.5$  Тл).

На сегодняшний день указанная величина  $I_c$  является наибольшим значением транспортного тока, полученного в проводах и лентах  $MgB_2$ .

Кроме того,  $MgB_2$  провода могут быть изготовлены как круглого, так и прямоугольного сечения, и имеют небольшой вес.

Значения критического тока в кабеле на основе  $MgB_2$  для различных величин магнитной индукции и температуры представлены на Рис. 20.

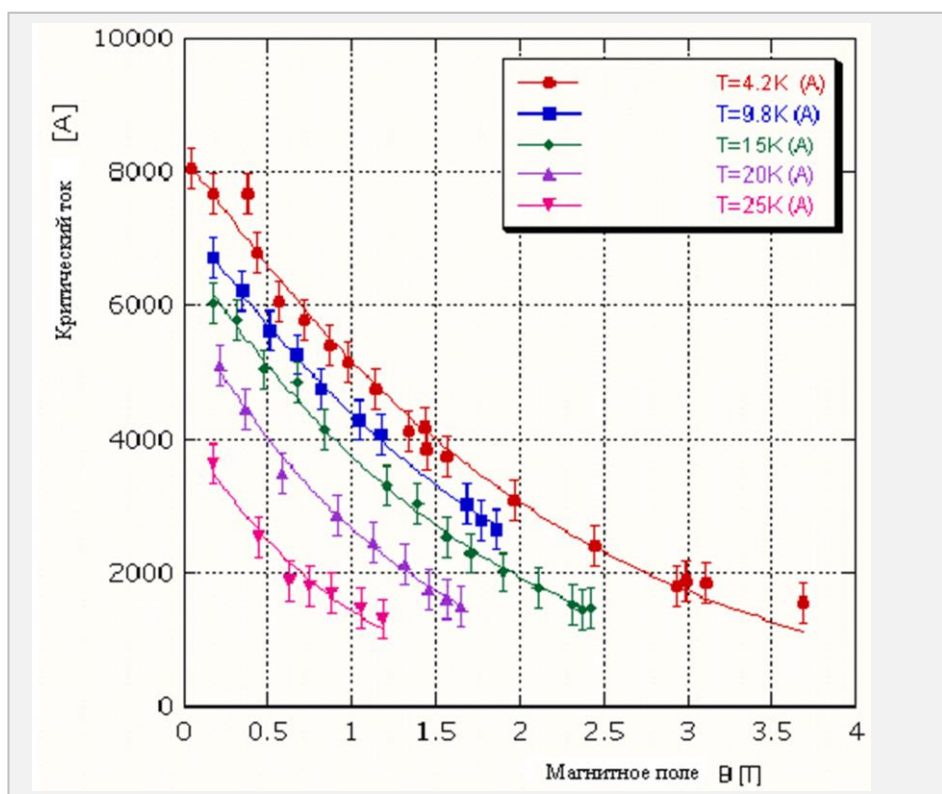


Рис. 20. Зависимость критического тока от магнитного поля при температурах 4,2 К, 9,8 К, 15 К, 20 К и 25 К в кабеле на основе  $MgB_2$  [19].

В качестве сабота рассмотрим наиболее простой вариант конструкции в виде параллелепипеда (см. Рис.12 и Рис.13г), чтобы исключить изгиб ВТСП-лент. Параметры элементов сабота даны в Таблице 3. Отметим, что для  $MgB_2$  метод твердофазного синтеза дает таблетки с довольно низкой плотностью  $\sim 1.1 \text{ г/см}^3$ , в то время как горячим газостатическим прессованием получают образцы с высокой плотностью  $2.43...2,45 \text{ г/см}^3$ , близкой к теоретической» [20].

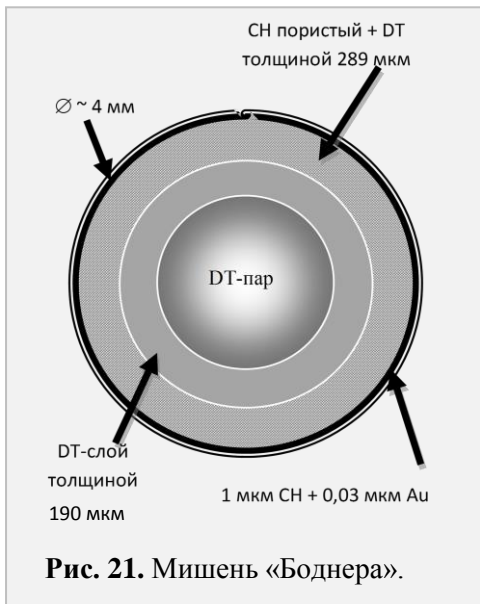
Таблица 3. Параметры элементов сабота для реакторной мишени «Боднера» [21].

Элементы сабота	Материал ( $\rho$ , г/см <sup>3</sup> )	Размеры элементов	Масса элементов	Масса сабота
ПЭС (матрица сабота)	Полистирол $\rho = 1.07 \text{ г/см}^3$	6x6x12 мм $V = 432 \text{ мм}^3$ ***Гнездо для КТМ ( $\varnothing = 4 \text{ мм}$ )	0.432 г	0.517 г
Ускорение (ВТСП- виток)	$MgB_2$ [20] $\rho = 2.45 \text{ г/см}^3$	$l = 24 \text{ мм}$ , $\varnothing = 0.8 \text{ мм}$ $V = 6.5 \text{ мм}^3$	$2.45 \times 6.5 \times 10^{-3} = 0.015 \text{ г}$	Масса КТМ
Левитация (**ВТСП-пластины)	*Gd123 $\rho = 3.25 \text{ г/см}^3$	6x12x0.3мм, $V = 21.6 \text{ мм}^3$	$3.25 \times 21.6 \times 10^{-3} = 0.07 \text{ г}$	4.3 мг

Примечание. \*/ Результаты измерения даны в настоящем Отчете, п. 1, Раздел II.

\*\*/ ВТСП-пластины – это система обеспечения левитации сабота в её наиболее простой форме. Возможно использование и более сложных конфигураций ВТСП, а также геометрии крепления к ПЭС.

\*\*\*/Результаты оптимизации гнезда сабота даны в Отчете по проекту РФФИ № 15-02-02497 за 2016 г [22].



**Таблица 4.** Массовые параметры КТМ «Боднера» (рассчитаны по численным кодам, разработанным в ФИАН).

DT-топливо	
Масса мишени (мкг)	4379.57
Масса оболочки (мкг)	160.53
– компактный СН-слой (мкг)	51.18
– пористый СН-слой (мкг)	109.35
Масса топлива (мкг)	4219.04
– в пористом слое (мкг)	2695.24
– чистый DT-слой (мкг)	1519.56
– DT-пар (мкг)	4.24
Плотность заполнения при $T = 300 \text{ К}$ ( $\text{мг}/\text{см}^3$ )	136.15

КТМ «Боднера» относится к классу реакторных КТМ прямого облучения с высоким энергетическим выходом ( $\sim 100$ ) [21]. Массовые параметры КТМ даны в Таблице 5. Внешний ее диаметр равен 4 мм. КТМ включает несколько слоев (см. Рис. 21):

- Слой золота (толщиной  $\Delta R = 0,03 \text{ мкм}$ ), который защищает топливный слой от воздействия излучения горячих стенок камеры реактора;
- Полимерный (СН) слой ( $\Delta R = 1 \text{ мкм}$ ) выполняет роль аблятора в процессе взаимодействия лазерного излучения с веществом КТМ;
- Пористый полимерный слой, насыщенный твердым DT-топливом ( $\Delta R = 289 \text{ мкм}$ ), позволяет замедлить развитие рэлей-тейлоровских неустойчивостей в процессе абляционного сжатия;
- Равнотолщинный криогенный слой из чистого DT-топлива ( $\Delta R = 190 \text{ мкм}$ );
- Внутренняя полость КТМ (радиус 1500 мкм), содержащая DT-пар.

Расчет длины ускорения для параметров сабота, указанных в Таблице 3, и параметров КТМ, указанных в Таблице 4, представлены в Таблице 5.

**Таблица 5.** Расчет длины ускорения для  $\text{MgB}_2$ -driving body.

Параметры задачи «Ускорение КТМ»	Исходные значения	Расчет: кабель на основе $\text{MgB}_2$ , $T_s = 20 \text{ К}$		
$V$ – требуемая скорость	200 м/с			
$M_{\text{sab}}$ – масса	0.5 г			
$r/r_s$	5			
$B_0$ – внешнее поле	→	1 Тл	0.5 Тл	0.25 Тл
$J_c$ – критический ток	→	2500 А	4000 А	5000 А
$a$ – ускорение	→	800 g	640 g	400 g
$L_a$ – длина ускорения	→	2.5 м	3.125 м	5.0 м

Таким образом, проведенные расчеты показали, что можно не только ускорить реакторную КТМ до требуемых скоростей инжекции ( $V = 200 \text{ м/с}$ ), но и обеспечить выполнение условия по снижению перегрузок в процессе ускорения ( $a < 500 \text{ g}$ ). Отметим, что в расчетах температура ускорения равна  $T_s = 20 \text{ К}$ , что является достаточно близкой величиной к верхнему ограничению по температуре  $T_{\text{inj}} \sim 18 \text{ К}$ , и не может значимо повлиять на результаты расчетов (см. Рис. 20).

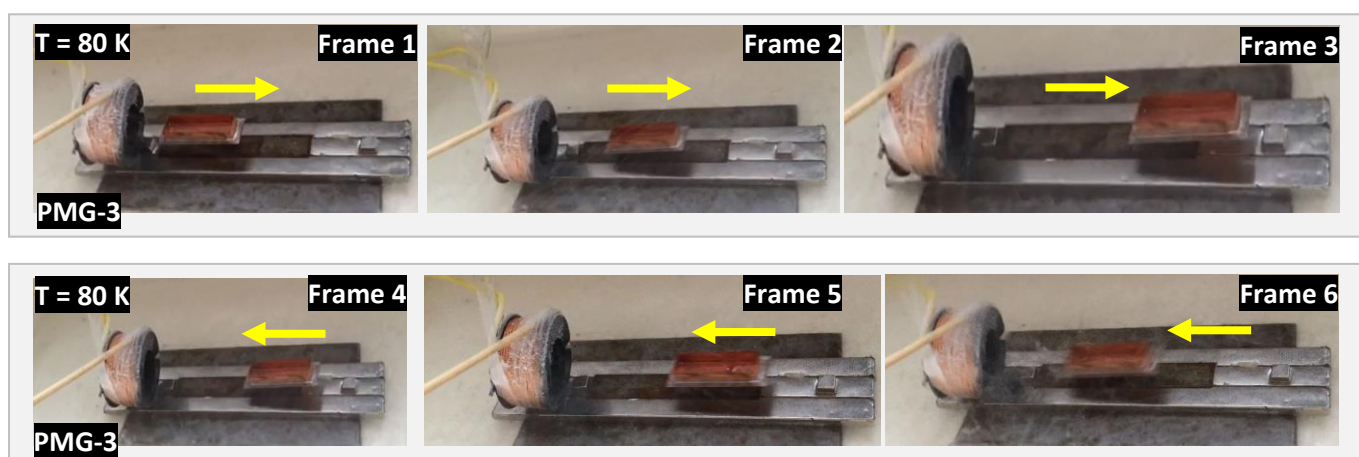
Теперь перейдем к расчету параметров, определяющих условия левитации ансамбля «САБОТ + КТМ».

## 4. РАСЧЕТ ПАРАМЕТРОВ СИСТЕМЫ ЛЕВИТАЦИИ

### 4.1. Экспериментальные результаты

В серии экспериментов был испытан способ электромагнитного ускорения ВТСП-сабота (модель с3). Вследствие эффекта Мейснера, на сверхпроводник в магнитном поле действуют силы, выталкивающие его из области большего поля, что может быть использовано для ускорения сверхпроводящего образца. В экспериментах использовалась магнитная система PMG-3 и одна катушка, укрепленная над магнитной системой PMG-3 (магнитным рельсом) таким образом, чтобы горизонтальная ось катушки и сабота, левитирующего над PMG-3, совпадали. Когда через катушку подается короткий импульс тока, сабот приходит в движение вдоль горизонтальной оси магнитной системы. Стоп-кадры видеозаписи ускорения ВТСП-сабота (модель с3) над системой PMG-3 представлены на Рис. 22. Параметры эксперимента даны ниже:

- Импульс тока длительностью 1 мс,
- Амплитуда тока 200 А создается при разряде конденсатора емкостью 1600 мкФарад,
- Зарядка конденсатора 300 Вольт, температура проведения эксперимента  $T = 80$  К.



**Рис. 22.** Стоп-кадры ускорения ВТСП-сабота (модель с3) в системе PMG-3 при  $T = 80$  К (электромагнитный запускающий импульс). Кадры 3, 5 и 6 даны с увеличением.

Результаты экспериментов свидетельствуют (см. также резюме к п. 1 настоящего раздела):

- Доказана возможность ускорения ВТСП-сабота электромагнитным импульсом;
- Доказана возможность одновременного ускорения ВТСП-сабота и его левитации за счет использования PMG-системы, когда трение корпуса сабота о стенки направляющей трубки инжектора исключено;
- Доказана возможность стабилизации высоты левитации между функциональными узлами;
- Доказана возможность цикличности процесса при использовании тормоза.

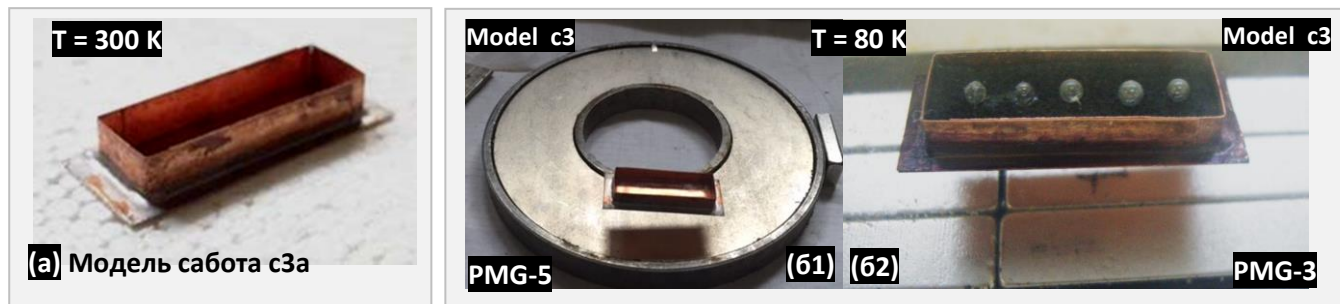
В экспериментах использовались различные PMG-системы, которые создавались на основе стандартных постоянных магнитов различной формы и размера (поставщик фирма МИДОРА) и вставок из магнитомягких (ферромагнитных) материалов. Подробное описание таких систем дано в отчете по проекту РФФИ №15-02-02497 за 2015 год [22].

Магнитные PMG-системы изготовлены на основе постоянных неодимовых магнитов (NdFeB) без покрытия с аксиальным намагничиванием. Измерения вертикальной составляющей магнитного поля PMG-систем проводилось с помощью магнитометра, изготовленного на основе датчика Холла типа ДХК-0.5А, с чувствительностью 280 мВ/Тл. Диапазон измеряемого поля  $\pm 1$  Тл, погрешность измерений  $\pm 0.005$  Тл, точность положения чувствительного элемента 0.1 мм.

## 4.2. Расчет силы и высоты левитации

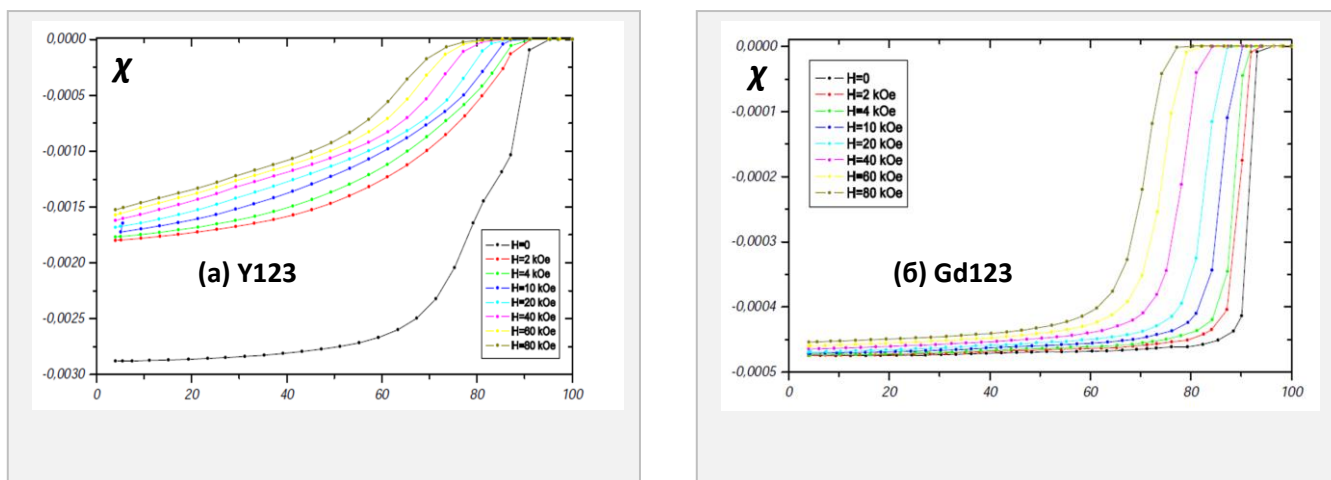
Теперь оценим силу и высоту левитации в экспериментах, представленных на Рис. 22. При этом используем параметры той модели сабота, которая использовалась в этих экспериментах (модель с3а, см. Рис. 25):

- Форма – параллелепипед с открытым верхом,
- Материал – Gd123 (плотность  $\rho = 3.25 \text{ г/см}^3$ , магнитная восприимчивость  $\rightarrow$  см. Рис. 24)
- Параметры: длина 24 мм, ширина (внутри) 8 мм, высота 4 мм, стенка 0.6 мм, масса 1.254 г,
- Распределение магнитного поля для системы PMG-3 представлено на Рис.25.



**Рис. 23.** В экспериментах модель сабота с3а (а) может использоваться как в линейных, так в круговых PMG, причем либо независимо (б1), либо в комбинации с другими объектами, например, как носитель мишеней (б2).

На Рис. 24 для сравнения представлены магнитные характеристики, важные для проведения расчетов, для двух типов ВТСП, используемых в проекте: Y123 и Gd123.



**Рис. 24.** Магнитная восприимчивость в зависимости от температуры для различных значений внешнего магнитного поля  $\mu_0 H_0 = 0, 1, 2, 4, 6, 8 \text{ Тл}$ .

Схема измерения поля в системе PMG-3 представлена на Рис. 25. Величина магнитного поля дана в Гауссах, расстояние по оси X (а) и по оси Z (б) дано в мм, при этом 0 совпадает с поверхностью магнитов.

В экспериментах с электромагнитным запускающим импульсом, обеспечивающим ускорение сабота, согласно Рис. 25,а магнитное поле для PMG-3 вдоль оси X в плоскости  $Z = 0$  постоянно и равно  $B = 0.33 \text{ Тл}$ , а при отражении от тормоза  $B = 0.42 \text{ Тл}$ .

Распределение поля по оси Z показано на Рис. 25,б.

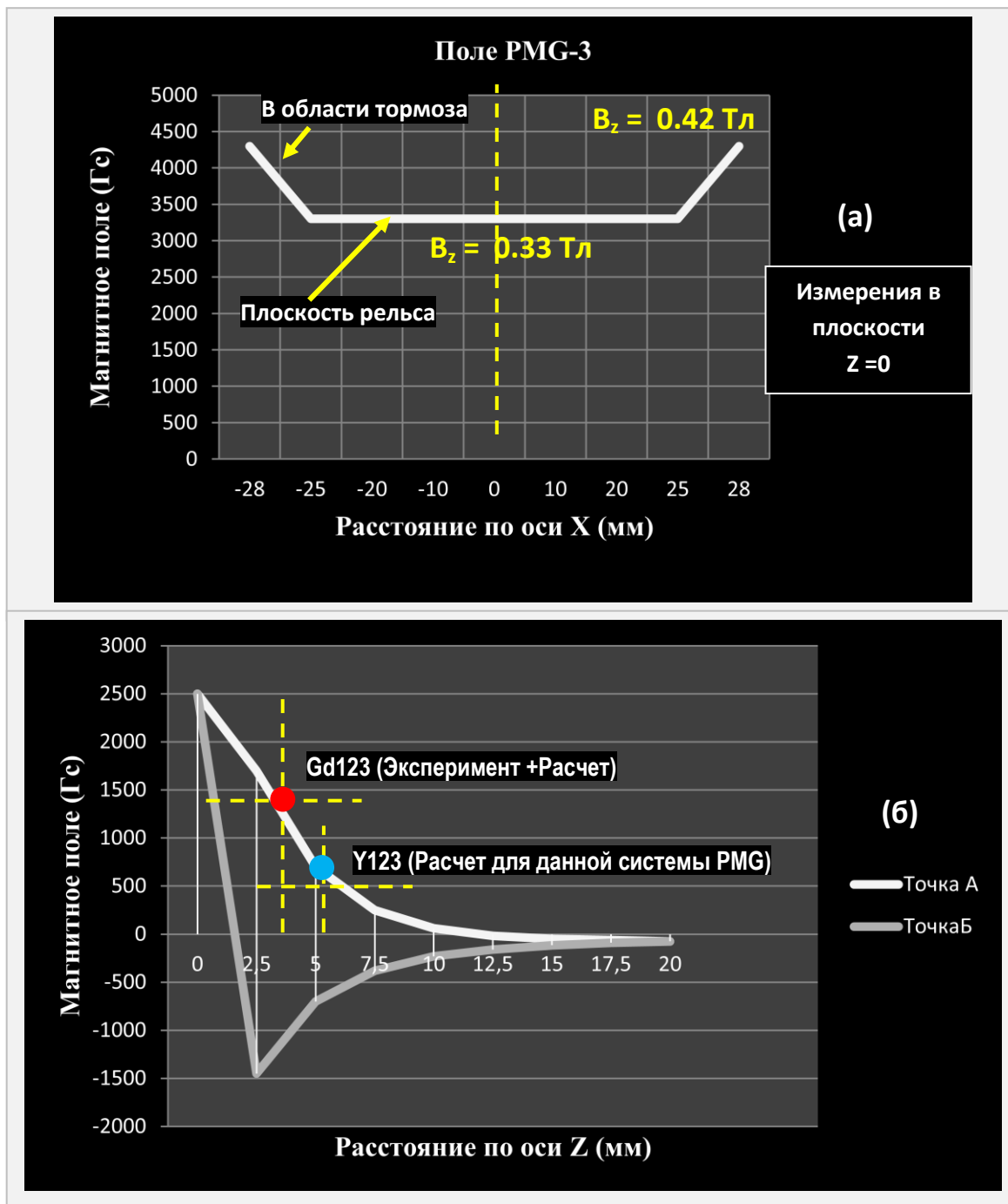


Рис. 25. Распределение магнитного поля в системе PMG-3 при ускорении ВТСП-сабота (эксперименты на Рис. 22, схема измерения на Рис. 26).

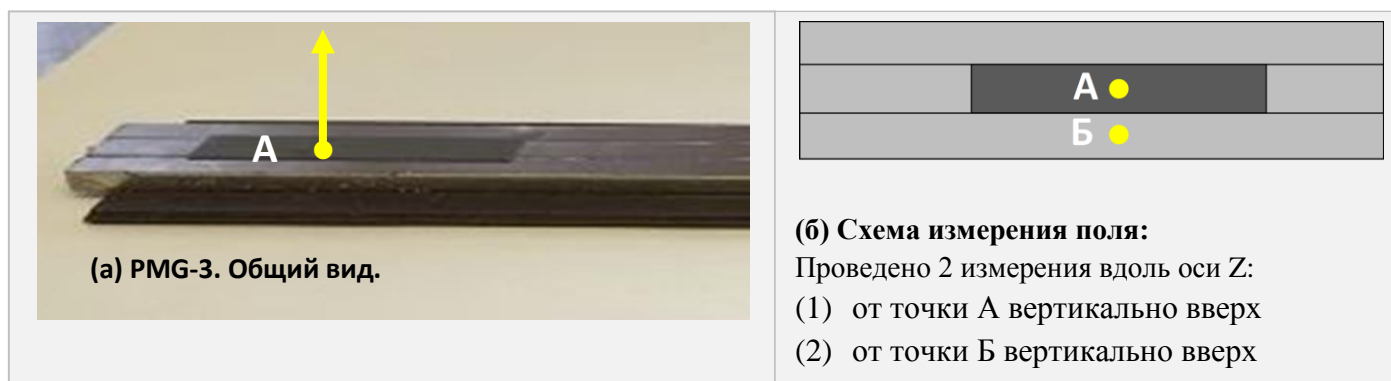


Рис. 26. Схема измерения магнитного поля в системе PMG-3 (результаты измерения на Рис. 25).

Условие левитации сабота запишется в виде

$$F_{lev} = g \cdot M, \quad (11)$$

где  $g$  – ускорение свободного падения,  $M$  – полная масса сабота,  $F_{lev}$  – сила левитации, возникающая за счет поверхностных токов, вытесняющих из сверхпроводника внешнее магнитное поле. Сила, необходимая для левитации сабота модели с3а (Рис.25), составит 0.01254 Н.

С другой стороны, сила, действующая на сверхпроводник в неоднородном магнитном поле, выражается следующим образом [23]:

$$\mathbf{F} = \int (\mathbf{J} \nabla) \mathbf{B}_0 dV,$$

где интеграл берется по объему сабота,  $\mathbf{J}$  – вектор намагниченности, наведенный полем в сверхпроводнике (в нашем случае это Ga123),  $\mathbf{B}_0$  – индукция магнитного поля системы PMG-3. Намагниченность  $\mathbf{J}$  в линейных средах пропорциональна полному полю  $\mathbf{H}$

$$\mathbf{J} = \chi \mathbf{H}, \quad (13)$$

где  $\chi$  – магнитная восприимчивость, которая для диамагнитных тел  $\chi < 0$ .

Вследствие малости магнитной восприимчивости для исследуемых ВТСП (как для Y123, так и для Gd123, см. Рис. 24) можно в первом приближении пренебречь искажением поля, и считать, что намагниченность пропорциональна внешнему магнитному полю  $B_0 = \mu_0 H_0$ . В этом случае получим следующее выражение для силы:

$$\mathbf{F} = \frac{\chi \mu_0}{2} \int \nabla (H_0^2) dV, \quad (14)$$

Поле системы PMG-3 можно считать постоянным на протяжении размеров тела (Рис. 25а), что позволяет, в первом приближении, величины, стоящие под знаком интеграла вынести за знак интеграла:

$$\mathbf{F} = \frac{\chi \mu_0}{2} \nabla (H_0^2) V = \frac{\chi}{2 \mu_0} \nabla (B_0^2), \quad (15)$$

Поскольку нас интересует сила левитации, направленная вдоль оси  $Z$ , то выражение (15) перепишем в удобном для нас виде:

$$F_{lev} = \frac{\chi_{lev}}{\mu_0} V_{lev} B_{0z} \frac{dB_{0z}}{dz}, \quad (16)$$

где  $B_{0z}$  и  $B_{0z} / dz$  – соответственно проекция индукции магнитного поля на ось  $Z$  и градиент этого поля на высоте левитации (Рис. 25,б),  $V_{lev}$  – объем левитирующего элемента,  $\chi_{lev}$  – магнитная восприимчивость материала левитирующего элемента (Рис. 13),  $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$  Н/А<sup>2</sup> – магнитная постоянная.

Таким образом, для проведения расчетов необходимо знать величины, которые перечислены в Таблице 5 для двух видов ВТСП материалов – Gd123 и Y123.



■ **Основные выводы:**

— Показано, что сила, необходимая для левитации сабота модели с3а (Gd123), составляет **0.01254 Н**. Проведенные экспериментальные и теоретические исследования показали, что требуемый результат ( $F_{lev} = \mathbf{0.01258\text{ Н}}$ , Таблица 6) надежно реализуется с помощью магнитного рельса в системе PMG-3 (Рис. 22).

— Показано также (Таблица 6 и Рис. 25), что возможно использование различных ВТСП материалов. В нашем случае это Gd123 (**0.01258 Н**) и Y123 (**0.01268 Н**).

**Таблица 6.** Расчет силы левитации двух ВТСП-саботов из Gd123 и Y123, имеющих одинаковый вес 1.254 г.

Параметры расчета	Температура T = 77 К	
	*Gd123	**Y123
$V_{lev}$	385.5 мм <sup>3</sup>	313.2 мм <sup>3</sup>
$\chi_{lev}$	$4\pi \cdot 4.5 \cdot 10^{-4}$	$4\pi \cdot 25 \cdot 10^{-4}$
$B_z$	0.145 Тл	0.06 Тл
$dB_z / dz$	0.05 Тл/мм	0.027 Тл/мм
$F_{lev}$	<b>0.01258 Н</b>	<b>0.01268 Н</b>

**Примечание.** \*/ Высота левитации ~ 3 мм для сабота из Gd123 (Эксперименты + Расчет, см. Рис. 25),  
 \*\*/ Высота левитации ~ 5 мм для сабота из Y123 (Расчет, см. также Рис. 25).

**5. РЕЗЮМЕ: КОНЦЕПЦИЯ БЕСКОНТАКТНОЙ СИСТЕМЫ ДОСТАВКИ**

В работе по проекту РФФИ № 15-02-02497 впервые предложен концепция построения бесконтактной доставки КТМ с использованием гибридных систем типа «ЭМ-инжектор + ВТСП-МАГЛЕВ системы» [8–11]. Концепция гибридного ЭМ-инжектора, разработанная в данном проекте, состоит из трех основных частей (Рис. 12 и 13): 1) *Сверхпроводящий сабот*, в состав которого входят: (а) ускоряемый ВТСП-элемент в виде колец или витков с током, который индуцируется в сверхпроводнике под действием магнитного поля соленоида («driving body»), (б) левитирующий элемент в виде ВТСП-пластин, (в) полимерная матрица со специальным гнездом для размещения КТМ; 2) *Магнитный рельс*, как составная часть PMG; 3) *Система ускорения*, состоящая из коротких соленоидов (могут быть выполнены из ВТСП-провода). Данная концепция гибридного ЭМ-инжектора отличается от известных систем ускорения [12–16] следующим:

— **Сверхпроводящий сабот**, который включает в себя не только ускоряемый ВТСП-виток (или витки) с током, но и ВТСП-пластины, обеспечивающие левитацию сабота.

— **Левитационная система ускорения**, которая включает в себя не только ускоряющую систему коротких соленоидов для генерации бегущей магнитной волны, но и магнитный рельс для обеспечения как левитации, так и стабилизации траектории ВТСП-сабота.

Подчеркнем, что наличие именно магнитного рельса, а также левитирующих ВТСП-пластин, как составной части сабота, дает возможность построить систему бесконтактной доставки КТМ, когда ансамбль «ВТСП сабот + КТМ» будет стабильно (за счет пиннинг-эффекта) ускоряться вдоль направляющей трубки инжектора без контакта с её стенками [8–11].

Возможность построения подобной системы доказана экспериментально (см. Рис.3 и 10).

Выбор ВТСП-материалов зависит от свойств самой КТМ. Ранее нами было показано [22], что выживаемость водородных слоев топлива, подверженных внешнему воздействию, зависит от структуры слоя. Формирование изотропных ультрадисперсных криогенных слоев является не только условием получения качественного топлива, но и условием сохранения этого качества вплоть до момента облучения КТМ мощным лазерным импульсом. Температура инъекции при этом может лежать в широком диапазоне  $4.2\text{ К} < T_{inj} < 18\text{ К}$ . Для анизотропных слоев из монокристалла инъекция КТМ в камеру реактора ЛТС должна осуществляться вблизи

температуры существования слоя, т.е. при  $T_{inj} \sim 18$  К, причем, согласно [6], максимальное изменение температуры DT-слоя в процессе ускорения КТМ не должно превышать  $\sim 100$  мК.

Таким образом, создание системы бесконтактного позиционирования и транспорта КТМ представляет собой одну из важнейших задач в общей программе ЛТС. В ФИАН ее решение предложено осуществить за счет инновационной схемы построения ускорителя с использованием ВТСП-МАГЛЕВ систем различного типа.

В настоящее время ВТСП-материалы в виде композитных лент на основе купратов становятся доступными для промышленного применения. Эти материалы, имеющие рекордные характеристики по критическим параметрам, являются перспективными кандидатами при разработке создании гибридных систем для бесконтактной доставки КТМ.

Разработки ФИАН в рамках текущего проекта включали исследование следующих ВТСП-материалов в качестве элементов, обеспечивающих левитацию ансамбля «САБОТ + КТМ»:

- Сверхпроводящая керамика на основе  $YBa_2Cu_3O_{7-x}$  (или Y123), и
- Ленточные сверхпроводники типа СуперОкс J-PI-12-20Ag-20Cu (или Gd123).

Исследования проводились в магнитных полях различной конфигурации для изучения условий ускорения саботов для КТМ. Полученные результаты, как теоретические, так и экспериментальные показали, что указанные ВТСП материалы могут успешно применяться при разработке и конструировании устройства доставки КТМ типа «ВТСП-МАГЛЕВ» с целью минимизировать риск разрушения топливного слоя в КТМ на этапе ее ускорения, а также обеспечить коррекцию ее траектории за счет эффекта пиннинга в ВТСП.

Кроме того, наши расчеты показали, что при использовании кабеля на основе  $MgB_2$  в качестве ускоряющего элемента (driving body) можно не только ускорить реакторную КТМ до требуемых скоростей ( $v = 200$  м/с), но и обеспечить выполнение условия по снижению перегрузок в процессе ускорения ( $a < 500$  g). Особо подчеркнем, что сверх-проводники на основе  $MgB_2$ , обладают неожиданно высокой для простого бинарного соединения критической температурой, равной 39 К. С 2001 года эти материалы находятся в зоне особого интереса научного сообщества. Несмотря на то, что критическая температура  $MgB_2$  намного ниже, чем у ВТСП, малая анизотропия сверхпроводящих свойств и низкая стоимость делают этот материал привлекательным для производства из него различных проводников и токо-несущих элементов. Пригодность  $MgB_2$  для использования в сверхпроводящих магнитах уже доказана на практике. В частности, итальянская компания ASG Superconductors изготовила катушку для магниторезонансного томографа на основе таких проводов [20].

Результаты, полученные за отчетный период, опубликованы в [11] и доложены на 34-й Международной (Звенигородской) конференции по Физике Плазмы и УТС [24].

## ЛИТЕРАТУРА К РАЗДЕЛУ II

1. I.V. Aleksandrova, E. R. Koresheva, O. N. Krokhin, and I. E. Osipov. *Cryogenic Hydrogen Fuel for Controlled Inertial Confinement Fusion (Review of world results)*. Problems of Atomic Sci. Technol., Ser. Termonuclear Fusion, vol. **38** (1), 57, 2015
2. I.V. Aleksandrova, E.R. Koresheva, O.N. Krokhin, I.E. Osipov. *Cryogenic Hydrogen Fuel for Controlled Inertial Confinement Fusion (Formation of Reactor-Scale Cryogenic Targets)*. Physics of Atomic Nuclei, vol. **79** (7), 1210, 2016.
3. I.V. Aleksandrova, E.R. Koresheva, E.L. Koshelev, I.E. Ospov. *Pilot Target Supply System Based on the FST Technologies: Main Building blocks, Layout Algorithms and Results of the Testing Experiments*. Plasma and Fusion Research, **8** (2), 3404052, 2013

4. D. Goodin. *IFE target technology development in the USA*. 3<sup>rd</sup> IAEA RCM on Physics and Technology of IFE Targets and Chambers (11–13 October, 2004, Daejeon, Rep. Korea)
5. D.T. Goodin, N.B. Alexander, G.E. Besenbruch, et al. *Developing a commercial production process for 500000 targets per day: A key challenge for inertial fusion energy*. *Physics of Plasmas*, vol. **13**, 056305, 2006
6. R. Miles, M. Spaeth, K. Manes, et al. *Challenges surrounding the injection and arrival of targets at life fusion chamber center*. *Fusion Sci. Technol.*, vol. **60**, 61, 2011
7. R. Kreutz. *Pellet Delivery for the Conceptual Inertial Confinement Fusion Reactor Hiball*. *Fusion Technol.*, **8**, 2708, 1985.
8. E.R. Koresheva, I.V. Aleksandrova, O.M. Ivanenko, et al. *HTSC maglev systems for IFE target transport applications*. *J. Russian Laser Research*, vol. **35** (2), 151, 2014
9. I.V. Aleksandrova, A.A. Akunets, P.I. Bezotosnyi, et al. *Using HTSC-band of second generation for cryogenic transport of IFE targets*. *Bulletin of the Lebedev Physics Institute*, vol. **42** (11), 3, 2015
10. I.V. Aleksandrova, A.A. Akunets, P.I. Bezotosnyi, et al. *A possibility to create the contact-free delivery system to transport the cryogenic hydrogen fuel for IFE power plants*. *Bulletin of the Lebedev Physics Institute*, vol. **43** (5), 160, 2016
11. I.V. Aleksandrova, A. A. Akunets, P. I. Bezotosnyi, et al. *Development of hybrid transport systems for delivering cryogenic fusion targets into focus of high-power laser system or ICF reactor*. *J. Russian Laser Research*, **35** (3), 211, 2017
12. K.W. Chen, R.W. Hartung, E. Lehman, and S.D. Mahanti. *Design of a magnetic linear accelerator (maglac) as driver for impact fusion (IF)*. *IEEE Transactions on Nucl. Sci.*, Vol. **NS-26**, No.3, 3118, 1979
13. D. Anderson, S. Claflin, F. Winterberg. *On the Acceleration of a Superconducting Macroparticle in a Magnetic Travelling Wave Accelerator*. *A Journal of Physical Sciences*, vol. **26** (9), 1415, 1971
14. R. Kreutz. *Basis and Concepts for the Electromagnetic Acceleration of Pellets for Injection into Inertial Confinement Fusion Reactor Chambers*. Preprint KfK 3465 of Institut für Neutronenphysik und Reaktortechnik, 1983
15. F. Winterberg. *Circular magnetic macroparticle accelerator to reach thermonuclear ignition*. *Physics of Fluids B: Plasma Physics*, **4**(10), 3350, 1992; doi: 10.1063/1.860390
16. H. Yoshida, H. Kato, F. Mayumi. *Model Experiments of Low-Temperature Magnetic Injection*. 3<sup>rd</sup> IAEA RCM on Physics and Technology of IFE Targets and Chambers (11-13 October 2004, Daejeon, Rep. Korea)
17. ITER Fusion Program, Related Activities, Progress Report, p. 80, 2007
18. D. Gajda, A.J. Zaleski, V.P. Dyakonov, et al. *Pinning Force in Superconducting Wires Nb–Ti*. XIV National School on Superconductivity, Ostrów Wielkopolski, October 13–17, 2009
19. Ю. Антонов, А. Зайцев. *Магнитолевитационная транспортная технология*. Издательство «Издательская фирма Физико-математическая литература», 2017
20. И.Ф. Кисляк, М.А. Тихоновский, Д.Г. Малыхин, и др. *Исследование сверхпроводимости массивного  $MgB_2$  и ex situ-проводов  $Fe(сталь)/MgB_2$* . *Вопросы атомной науки и техники, №6, Серия: Вакуум, чистые материалы, сверхпроводники*, 107, 2009
21. S.E. Bodner, D.G. Colombant, A.J. Schmitt, et al. *High Gain Target Design for Laser Fusion*. *Phys. Plasmas* **7**, 2298, 2000; "New High Gain Target Design for a Laser Fusion Power Plant," Proc. IAEA Technical Meeting on Inertial Fusion Energy and Chambers, Madrid, Spain, June 7, 2000
22. Отчет по проекту РФФИ № 15-02-02497 за 2015 и 2016 гг. , <http://sites.lebedev.ru/ru/nfo/3762.html>
23. Ландау Л.Д., Лившиц Е.М. *Теоретическая физика. Электродинамика сплошных сред*. Т. 8. М.: Наука, 1982. 623 с.
24. И.В. Александрова, А.А. Акунец, П.И. Безотосный и др. *Применение ВТСП в системе инжекционной доставки криогенных мишеней*. XLIV Международная (Звенигородская) конференция по Физике Плазмы и УТС, 13-17 февраля 2017 г.

### III. ЗАВЕРШЕНИЕ РАЗРАБОТКИ КОНЦЕПЦИИ СИСТЕМЫ ЗАЩИТЫ ТОПЛИВНОГО СЛОЯ КТМ, КАК ЭЛЕМЕНТА ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ БАЗЫ МОЩНОЙ ЛАЗЕРНОЙ УСТАНОВКИ ИЛИ РЕАКТОРА ЛТС

Проблема использования криогенных топливных мишеней (КТМ) в экспериментах по лазерному термоядерному синтезу (ЛТС) и, особенно, в будущем реакторе, включает в себя не только задачу получения качественного криогенного слоя топлива, но и задачу доставки готовых КТМ в зону лазерного облучения при условии сохранения параметров топливного слоя (разнотолщинность  $< 1\%$ , шероховатость  $< 1$  мкм).

Отметим, что частотная подача топлива является необходимым условием проведения современных экспериментов по ИТС и перехода к реакторным технологиям. Поэтому одна из важнейших задач при производстве КТМ — это выживаемость криогенных топливных слоев в процессе доставки КТМ в фокус мощной лазерной установки [1]. Процесс доставки включает в себя стадию ускорения КТМ в инжекторе и стадию полета инжектированной КТМ внутри камеры реактора ЛТС. Принципиально не устранимыми источниками механического и теплового разрушения КТМ на этих стадиях являются перегрузки при ускорении и теплопритоки от излучения стенок камеры и горячего остаточного газа. Это может привести к потере качества слоя, т.е., к появлению разнотолщинности и шероховатости слоя сверх допустимого уровня.

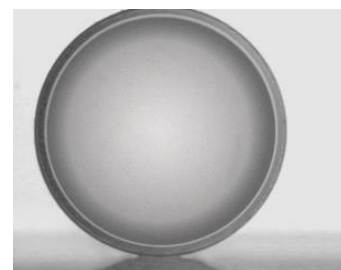
Поиск решения данной проблемы возможен на многоцелевой основе, главные направления которой изложены ниже.

#### 1. ФОРМИРОВАНИЕ УЛЬТРАДИСПЕРСНЫХ КРИОГЕННЫХ СЛОЕВ, ОБЛАДАЮЩИХ ДОЛГОЖИВУЩИМИ ХАРАКТЕРИСТИКАМИ КАЧЕСТВА

Ключевым решением данной проблемы является создание топливного слоя с такой микроструктурой, которая обладает максимально высокой устойчивостью к вариации внешних условий. Данная задача решалась нами в течение ряда лет, что позволило разработать технологию формирования изотропного топливного слоя, находящегося в изотропном ультрадисперсном состоянии, стабилизированном за счет специальных добавок к топливу (метод FST [1–10], см. Рис. 1). В работе над данным проектом [11] было показано, что формирование именно таких слоев является не только условием получения качественного топлива, но и условием сохранения этого качества вплоть до момента облучения КТМ.

Изотропные ультрадисперсные слои можно отнести к классу слоев, обладающих свойством самосохранения, имея в виду их высокую механическую и тепловую устойчивость. По существу, речь идет о получении новых функциональных структур топливного слоя, обладающих долгоживущими характеристиками качества. Последнее имеет первостепенное значение для практической реализации требований по физике сжатия КТМ, а также сохранения качества топливного слоя при доставке готовых КТМ в камеру реактора ЛТС. Результаты Проекта по данной тематике, опубликованы в работе [4].

В 2016 году в рамках настоящего проекта РФФИ были выполнены экспериментальные исследования с использованием криогенного пьезовибратора. Эксперименты показали, что



**Рис. 1.** Криогенный слой D2-топлива (толщина 41 мкм) в ультрадисперсном состоянии. Сформирован внутри оболочки из полистирола ( $\varnothing = 1$  мм) методом FST.

наличие внешних периодических воздействий на жидкую фазу вещества в процессе его кристаллизации позволяет регулировать дисперсность получаемой твердой фазы и повысить устойчивость слоя, а значит сделать технологию FST более надежной и дешевой [6, 7, 11]. Такие периодические механические воздействия приводят к тому, что, начиная с некоторого момента времени, определяемого амплитудой и частотой воздействия, 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. Теоретическое обоснование данного подхода при формировании КТМ проведено в рамках данного Проекта [10, 11].

## 2. ВНЕШНИЕ ЗАЩИТНЫЕ ФАКТОРЫ

Другой подход к решению проблемы сохранения параметров топливного слоя основан на применении специальных защитных средств для КТМ как целого. Ниже мы рассмотрим ряд методов, разработанных в ФИАН для реализации поставленной задачи.

### 2.1. Защитная крышка

Отметим, что в случае, когда дизайн реакторной камеры включает остаточный газ, инжектированная КТМ подвергается не только тепловому излучению стенок камеры, но и конвективному нагреву со стороны горячего остаточного газа. В этих условиях проблема выживания инжектированной мишени становится еще более сложной. В ряде работ предложено использовать металлические экраны – плоские [12] или цилиндрические [13], летящие в камере перед КТМ. Специалистами ФИАН предложен другой подход [14, 15] – использовать защитную крышку из отвержденных газов, которая инжектируется в камеру реактора вместе с КТМ и летит перед ней (Рис. 2), защищая ее от воздействия лобового ветра из горячих остаточных газов. В процессе движения по камере защитная крышка постепенно испаряется и, к моменту прихода КТМ в зону облучения, она полностью исчезает. Как показали расчеты [14], применение защитной крышки позволяет снизить тепловой поток на КТМ от остаточного газа в 4–5 раз. Устройство частотной сборки «Сабот + КТМ + Защитная Крышка» (Рис. 3) было разработано и предложено нами в работе [14].

### 2.2. Внешний защитный слой из металла

Общепринято, что тонкие металлические слои, напыленные на внешнюю поверхность КТМ, могут служить хорошей защитой топливного слоя от разрушения тепловым излучением стенок камеры

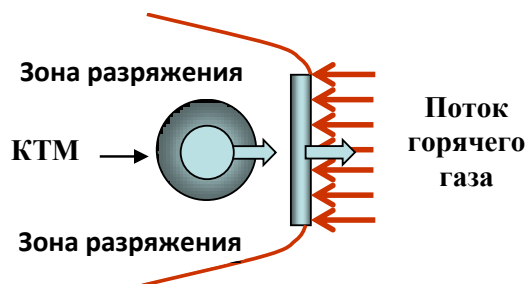


Рис. 2. Полет КТМ и защитной крышки в камере реактора.

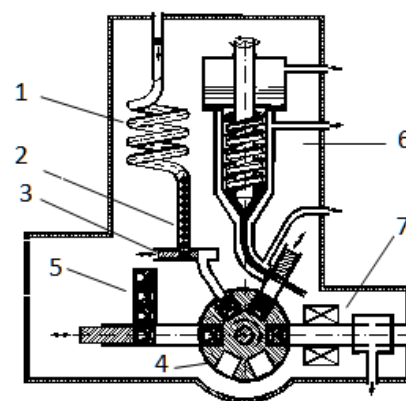
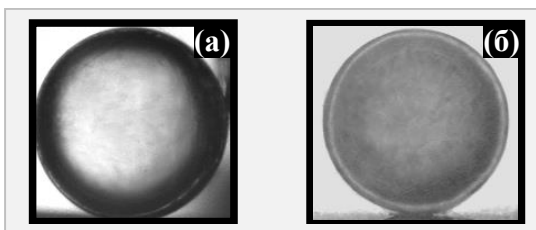


Рис. 3. Схема устройства для частотной сборки ансамблей «Сабот + КТМ + Защитная Крышка» [12]: 1 – модуль FST-формирования КТМ, 2 – накопитель с массивом готовых КТМ, 3 – шиббер для гравитационной подачи КТМ в сборочный барабан, 4 – сборочный барабан, 5 – магазин саботов, 6 – экструдер для производства защитных крышек из твердого дейтерия, 7 – соленоид для подачи ансамблей «Сабот + КТМ + Защитная Крышка» на стартовую позицию в инжектор.



**Рис. 4.** КТМ с внешним металлическим покрытием (производство ФИАН): (а) внешнее покрытие  $150 \text{ \AA}$  из Pd, криогенный слой  $\text{H}_2+5\% \text{HD}$  толщиной 44 мкм, сформированный на внутренней поверхности полимерной оболочки  $\varnothing 1.4$  мм; (б) внешнее покрытие  $200 \text{ \AA}$  из сплава Pt/Pd, криогенный слой  $\text{D}_2+3\% \text{Ne}$  толщиной 50 мкм, сформированный на внутренней поверхности полимерной оболочки  $\varnothing 1.5$  мм.

металлический слой также позволяет ускорить процесс формирования внутри КТМ топливного слоя по методу FST [17].

Отметим, что наши разработки по заполнению оболочек покрытых палладием, были приняты к использованию в Калифорнийском Университете г. Сан Диего, США [18].

### 2.3. Внешний защитный слой из отвержденных газов

Наши исследования показали [14, 19], что перспективным элементом защиты КТМ является криогенный слой из твердого  $\text{D}_2$  или ксенона, нанесенный на внешнюю поверхность КТМ. Этот криогенный слой защищает КТМ от перегрева излучением горячих стенок камеры реактора. Под воздействием излучения стенок слой постепенно испаряется, охлаждая КТМ и защищая от перегрева топливный слой, расположенный внутри капсулы.

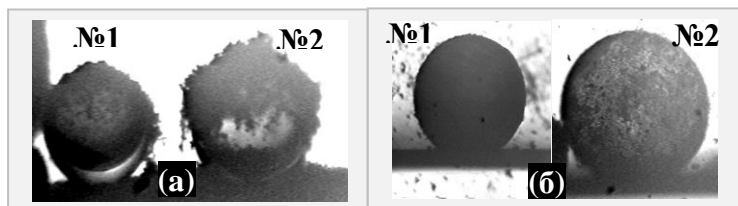
Технология создания внешнего защитного криогенного слоя была разработана нами и продемонстрирована с использованием твердого кислорода. Для создания внешнего криогенного слоя использовался пьезовибратор. Описание этого устройства дано в разделе I настоящего отчета. Эксперименты были выполнены следующим образом (см. Рис. 5):

— В каждой оболочке содержится жидкий водород при  $T = 14.6 \text{ K}$ . Снаружи в верхней части оболочек расположен кислородный снег (тройная точка для кислорода  $54.3 \text{ K}$ );

— После работы вибратора в режиме подскока (мода  $O$ , см. Рис. 2 и 3 в Разделе I) твердый кислород равномерно распределяется по внешней поверхности оболочек в виде защитного криогенного слоя.

Отметим, что оболочка слева на Рис. 5 (оболочка №1) имеет внешний слой палладия (толщина  $150 \text{ \AA}$ ), что крайне важно для формирования двойного защитного покрытия, а именно: «Металлический слой + Криогенный слой».

реактора. Однако наличие металлического слоя может существенно повлиять на процесс заполнения КТМ топливным газом. Поэтому в работах ФИАН [15, 16] разработана технология напыления на поверхность КТМ-капсулы палладия, платины или их сплавов (Рис. 4). Такой слой не только может защитить инжектированную КТМ от излучения стенок камеры, но и ускорить процесс диффузионного заполнения КТМ топливным газом, что и было продемонстрировано в экспериментах ФИАН [16]. Это связано с тем, что палладий (а также платина) служит катализатором диссоциации молекулярной фазы водорода в атомарную, что ускоряет диффузию топлива сквозь полимерную оболочку КТМ. Кроме того, как показали наши расчеты, такой



**Рис. 5.** Создание внешнего криогенного защитного слоя из кислородного  $\text{O}_2$ -снега: а) две полимерные оболочки внутри вибратора до эксперимента, оболочка №1 имеет покрытие из палладия ( $150 \text{ \AA}$ ); б) после работы вибратора непрозрачный защитный криогенный слой равномерно покрывает каждую КТМ.

## 2.4. Снижение тепловых и механических нагрузок на КТМ в процессе ее ускорения

В процессе доставки КТМ размещается в специальном носителе (т.н. сабот). При ускорении сабота вместе с лежащей в нем КТМ, возникают механические перегрузки, воздействующие на КТМ со стороны опоры мишенного гнезда. В исследованиях 2016 года в рамках данного проекта [11], было проведено моделирование и оптимизация геометрии опоры КТМ в мишенном гнезде сабота. Было показано, что применение конической опоры с углом в основании конуса равным  $87^{\circ}$  позволяет повысить допустимые перегрузки на КТМ более чем в 20 раз по сравнению с плоской опорой. Таким образом, использование сабота со специально профилированным мишенным гнездом является эффективным средством защиты КТМ от механического разрушения на этапе ускорения ансамбля «Сабот + КТМ».

В процессе ускорения ансамбля «Сабот+ КТМ» существует и другая угроза разрушения топливного слоя – это выделение тепла за счет трения поверхности сабота о стенки направляющей трубки инжектора. С целью защиты КТМ от разрушения на этапе ускорения, в настоящем проекте была разработана концепция бесконтактной доставки ВТСП сабота при использовании эффекта квантовой левитации сверхпроводника (см. Раздел II настоящего отчета). Эти исследования проводились в магнитных полях различной конфигурации с использованием макетов саботов, изготовленных из различных ВТСП материалов (см. Рис. 6 и 7, а также Рис. 1-10 из Раздела II), в том числе: сверхпроводящая керамика на основе  $YBa_2Cu_3O_{7-x}$  (исследования 2015 и 2016 гг., см. [11]), ленточные ВТСП 2-го поколения производства фирмы СуперОкс, выполненные на основе Gd123 (отчетный период). Кроме того, за отчетный период были исследованы сверхпроводники на основе  $MgB_2$ . Основные выводы этих исследований:

- 1) Теоретически и экспериментально показано, что исследованные материалы могут успешно применяться при разработке и конструировании электромагнитного инжектора КТМ с системой коррекции траектории сабота типа «ВТСП-МАГЛЕВ» с целью минимизировать риск разрушения топливного слоя в КТМ на этапе ее ускорения [20, 21].
- 2) Демонстрация одновременного ускорения и левитации ВТСП сабота в поле короткого соленоида и системы МАГЛЕВ показана на Рис. 10 и Рис. 22 (см. Раздел II настоящего отчета).

## 3. КОНЦЕПЦИЯ МНОГОУРОВНЕВОЙ СИСТЕМЫ ЗАЩИТЫ ТОПЛИВНОГО СЛОЯ

Процесс формирования и доставки КТМ с необходимостью включает в себя систему многоуровневой защиты топливного слоя, функционирование которой основано на принципах, продемонстрированных нами ранее, а также в ходе текущего проекта РФФИ:

1. Применение топливного слоя с изотропной высокодисперсной микроструктурой → для снижения чувствительности топливного слоя к воздействию внешних тепловых и механических нагрузок.
2. Применение способа бесконтактной доставки ансамбля «ВТСП сабот + КТМ» → для снижения теплового потока на КТМ.
3. Применение конической опоры мишенного гнезда в саботе → для снижения механических нагрузок, возникающих в процессе ускорения ансамбля «ВТСП Сабот + КТМ».
4. Инжекция мишени вместе с защитной крышкой из отвержденного газа → для снижения риска разрушения топливного слоя под действием горячего остаточного газа в камере реактора ИТС.
5. Применение внешних покрытий КТМ-капсулы → для снижения риска разрушения топливного слоя под действием излучения горячих стенок камеры реактора ЛТС, в том числе:

- Внешние защитные криогенные слои (из отвержденного дейтерия, водорода или ксенона)
- Внешние защитные металлические слои на основе палладия, платины и их сплавов
- Применение двойного защитного покрытия «Металлический слой + Криогенный слой»



**Рис. 6.** Подготовка экспериментов по левитации полимерных оболочек в магнитных полях различной конфигурации с использованием макетов саботов, изготовленных из различных ВТСП материалов.



**Рис. 7.** ВТСП сабот (Gd123) с медной вставкой и полимерными оболочками перед началом эксперимента.

### ЛИТЕРАТУРА К РАЗДЕЛУ III

1. И.В. Александрова, Е.Р. Корешева, О.Н. Крохин, И.Е. Осипов. *Криогенное водородное топливо для управляемого инерциального термоядерного синтеза. Часть 1. Обзор мировых результатов.* ВАНТ, Сер. Термоядерный синтез, т. 38, вып. 1, с. 57, 2015
2. I.V. Aleksandrova, E.R. Koresheva, I.E. Ospov, et al. *Ultra-fine fuel layers for application to ICF/IFE targets.* Fusion Sci. Technol., **63**, 106, 2013
3. I.V. Aleksandrova, E.R. Koresheva, E.L. Koshelev, I.E. Ospov. *Pilot Target Supply System Based on the FST Technologies: Main Building blocks, Layout Algorithms and Results of the Testing Experiments.* Plasma and Fusion Research, **8** (2), 3404052, 2013



4. И.В. Александрова, Е.Р. Корешева, Е.Л. Кошелев, и др. *Криогенное водородное топливо для управляемого инерциального термоядерного синтеза (Концепция фабрики криогенных мишеней на основе метода FST)*. ВАНТ, сер. Термоядерный Синтез **39** (1), с. 29, 2016
5. E.R. Koresheva. *FST transmission line for mass manufacturing of IFE targets*. 1<sup>st</sup> IAEA RCM of the CRP Pathways to Energy from Inertial Fusion: Materials beyond ignition. (February 16–19, 2016, Vienna, Austria)
6. И.В. Александрова, А.А. Акунец, П.И. Безотосный и др. *Диспергирование топливного слоя внутри сферической оболочки за счет внешнего периодического воздействия: теория и эксперимент*. Тезисы доклада, XLIII Международная (Звенигородская) конференция по Физике Плазмы и УТС, 8-12 февраля 2016 г.;
7. I.V. Aleksandrova, A.A. Akunets, E.R. Koresheva, E.L. Koshelev, T.P. Timasheva. *Cryogenic layer fabrication in the conditions of high-frequency mechanical influence*. 34<sup>th</sup> European conference on Laser Interaction with Matter (September 18–23, 2016, Moscow, Russia)
8. I.V. Aleksandrova, E.R. Koresheva, E.L. Koshelev, A.I. Nikitenko, and I.E. Osipov. *Conception of cryogenic target factory for mass manufacturing and high-rep-rate delivery of IFE targets*. 34<sup>th</sup> European conference on Laser Interaction with Matter (September 18–23, 2016, Moscow, Russia)
9. I.V. Aleksandrova and E.R. Koresheva. *Review on high rep-rate and mass-production of the cryogenic targets for laser IFE*. High Power Laser Science and Engineering, **5** (2), e11, 2017
10. И.В. Александрова, А.А. Акунец, Е.Р. Корешева, Е.Л. Кошелев, Т.П. Тимашева. *Формирование ультрадисперсного водородного слоя при внешнем вибрационном воздействии на криогенную мишень*. ВАНТ. Сер. Термоядерный синтез, т. 40, вып. 3, с. 49, 2017
11. Отчеты по проекту РФФИ за 2015 и 2016 гг.; <http://sites.lebedev.ru/ru/nfo/3762.html>
12. E.I. Valmianski, R.W. Petzoldt, N.B. Alexander. *Wake shield target protection*. Fusion Sci. Technol., vol. **43** (3), 346-352, 2003
13. R. Tsuji. *Flying metal pipe for target transport in inertial fusion energy reactor*. Fusion Sci. Technol., vol. **43** (3), 327-333, 2003
14. I.E. Osipov, E.R. Koresheva, G.D. Baranov, et al. *A Device for Cryotarget Rep-Rate Delivery in IFE Target Chamber*. in: Inertial Fusion Science and Application, State of the art 2001 (ELSEVIER), 810-814, 2002
15. E.R. Koresheva, I.V. Aleksandrova, I.E. Osipov, et al. *Progress in the Extension of Free- Standing Target Technologies on IFE Requirements*. Fusion Sci. Technol., vol. **43** (3), 290-300, 2003
16. E.R. Koresheva. *Progress in the Extension of Free- Standing Target Technologies on IFE Requirements*. 2<sup>nd</sup> IAEA TM on Physics and Technology of Inertial Fusion Energy Targets and Chambers (June 17-19, 2002, San Diego, USA); <http://aries.ucsd.edu/LIB/MEETINGS/>
17. I.V. Aleksandrova, S.V. Bazdenkov, V.I. Chtcherbakov, et al. *An efficient method of fuel ice formation in moving free standing ICF / IFE targets*. J. Phys. D: Appl. Phys. vol. **37**, 1163-1179, 2004
18. E.H. Stefens, A. Nikroo, D.T. Goodin, R.W. Petzoldt. *Optimizing high-Z coatings for inertial fusion energy shells*. Fusion Sci. Technol., vol. **43** (3), 346-352, 2003
19. E.R. Koresheva, I.E. Osipov, I.V. Aleksandrova. *Free-standing target technologies for inertial confinement fusion: fabrication, characterization, delivery*. Laser and Particle Beams, vol. **23**, 563-571, 2005
20. И.В. Александрова, А.А. Акунец, П.И. Безотосный и др. *Применение ВТСП в системе инжекционной доставки криогенных мишеней*. Стендовый доклад, XLIV Международная (Звенигородская) конференция по Физике Плазмы и УТС, 13-17 февраля 2017 г.; <http://www.fpl.gpi.ru/Zvenigorod/XLIV/> I.html#Секција I, доклад № 19

21. I.V.Aleksandrova, A.A.Akunets, P.I.Bezotosnyi, et al. *Development of hybrid transport systems for delivering cryogenic fusion targets into focus of high-power laser system or ICF reactor*. J. Russian Laser Research, vol. **38** (3), 249-264, 2017

#### IV. ЗАВЕРШЕНИЕ ПАТЕНТОВАНИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ ПРОЕКТА

Процесс патентования результатов проекта включал следующие этапы:

1. В декабре 2016 г. в Федеральную службу по интеллектуальной собственности (ФСИС) была подана заявка на патент под названием «Способ доставки криогенных топливных мишеней для лазерного термоядерного синтеза».

2. Заявка принята на рассмотрение во ФСИС под № 2016147992 (дата регистрации 07.12.2016 г.) [1].

3. 26 января 2017 г. получено уведомление ФСИС о положительном результате формальной экспертизы.

4. 09 февраля 2017 г. получено уведомление ФСИС о начале экспертизы заявки по существу.

5. 05 сентября 2017 г. от ФСИС получено уведомление о завершении экспертизы заявки по существу, на основании которой принято решение о выдаче патента.

6. 15 ноября 2017 г. получен патент на изобретение [2]. Титульный лист патента показан на Рис. 1.

Таким образом, процесс патентования результатов проекта завершен успешно.

#### ЛИТЕРАТУРА К РАЗДЕЛУ IV

1. Заявка на патент «Способ доставки криогенных топливных мишеней для лазерного термоядерного синтеза», регистрационный номер 2016147992, дата регистрации 07.12.2016
2. Патент РФ на изобретение «Способ доставки криогенных топливных мишеней для лазерного термоядерного синтеза», номер №2635660 от 15 ноября 2017 г. Авторы: Е.Р.Корешева, И.В.Александрова, А.А.Акунец, П.И.Безотосный, И.С.Блохин, С.Ю.Гаврилкин, О.М.Иваненко, Е.Л.Кошелев, К.В.Мицен, Л.В.Панина.



Рис. 1. Титульный лист патента на изобретение №2635660 от 15 ноября 2017 г.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Исследования, проведенные в рамках проекта в 2015-2016 гг. послужили надежной базой для выполнения задач, поставленных на 3-й год работы. В результате получено следующее:

■ *Выполнено моделирование по структурной релаксации термоядерного слоя топлива при периодическом механическом воздействии (т.е. воздействие вибраций) на КТМ.*

1. Моделирование работы модуля формирования с криогенным пьезо-вибратором (МФ-КПВ) с двумя вибрирующими пластинами показало, что требуемая симметрия слоя на уровне 1% за счёт механизма «конфетти» может быть достигнута при достаточно большом количестве соударений, а именно:  $N \sim 10000$  и более, что надежно реализуется в МФ-КПВ.

2. С целью уменьшения времени формирования  $\tau_{\text{form}}$  изотропного высокодисперсного (или ультрадисперсного) слоя топлива выполнен расчет величины  $\tau_{\text{form}}$  для различных КТМ, начиная от КТМ для установки OMEGA до КТМ реакторного класса (CHGT-1). Получены следующие результаты: при индивидуальной оптимизации использование МФ-КПВ с двумя вибрирующими пластинами позволяет достичь величины  $\tau_{\text{form}} < 10$  мин, причем в широком диапазоне изменения высоты подъема КТМ в зависимости от частоты управляющего импульса. Это говорит о возможности использования МФ-КПВ как самостоятельного инструмента для формирования КТМ прямого сжатия с заданной структурой топливного слоя. Подчеркнем, что при формировании КТМ в МФ-КПВ с одной рабочей пластиной, время формирования лежит в диапазоне от 3 до 17 ч.

3. Сформулированы рекомендации по созданию нового модуля формирования для КТМ различного дизайна, в том числе:

— Дальнейшие исследования могут быть связаны с изменением конфигурации самого МФ-КПВ, который рассматривается в виде квазизамкнутой полости с профилированной поверхностью, работающей в режиме генерации моды отражения или смешанной моды, причем вымораживание слоя может осуществляться одновременно в нескольких оболочках, что перспективно для создания технологии массового производства КТМ.

— Другая возможность – это модернизация уже существующего МФ, основным элементом которого является канал формирования (КФ) в виде простой или двойной спирали. Вибрации с частотой от 3.5 до 10 кГц, способствующие структурированию топлива, рекомендуется возбуждать в верхней части КФ, который в процессе вымораживания топлива будет служить своеобразным волноводом для передачи возмущения на движущуюся КТМ. Такие условия способствуют формированию криогенного слоя в виде высокодисперсной структуры, что обеспечивает сохранение качества слоя при ускорении, инжекции и транспорте КТМ в камеру реактора ЛТС, а также дальнейшему снижению времени формирования криогенного слоя в виде ультрадисперсной структуры до величин  $\sim 1$  мин.

■ *Завершена разработка концепции инжектора с системой коррекции траектории сабота (носителя КТМ), работающей на основе эффекта квантовой левитации ВТСП.*

Разработанная концепция гибридного электромагнитного (ЭМ) инжектора, которая включает в себя три основных части:

— Сверхпроводящий сабот, включающий в свой состав (а) ускоряемый ВТСП-элемент в виде колец или витков с током, который индуцируется в сверхпроводнике под действием магнитного поля соленоида («driving body»), (б) левитирующий ВТСП-элемент в виде пластин, и (в) полимерную матрицу со специальным гнездом для размещения КТМ.

— Магнитный рельс, входящий в PMG (permanent magnet guideway) систему, которая используется для левитации и стабилизации траектории сабота за счет наличия ВТСП-пластин (составная часть сабота).

— Система ускорения, состоящая из коротких соленоидов для генерации бегущей магнитной волны. Каждый соленоид может быть выполнен из ВТСП-провода.

Данная концепция инжектора отличается от известных систем ускорения следующим:

— *Сверхпроводящий сабот*, который содержит в себе не только ускоряемый ВТСП-виток (или витки) с током, но и ВТСП-пластины, обеспечивающие левитацию сабота.

— *Левитационная система ускорения*, которая содержит в себе не только ускоряющую систему коротких соленоидов для генерации бегущей магнитной волны, но и магнитный рельс для обеспечения как левитации, так и стабилизации траектории ВТСП-сабота.

Подчеркнем, что наличие именно магнитного рельса, а также левитирующих ВТСП-пластин, как составной части сабота, дает возможность построить систему бесконтактной доставки КТМ, когда ансамбль «КТМ + ВТСП сабот» будет стабильно (за счет пиннинг-эффекта) ускоряться вдоль направляющей трубки инжектора без контакта с её стенками.

В подтверждение работоспособности предложенной концепции выполнено следующее:

1. В дополнение к экспериментам 2015-2016 гг. с различными ВТСП образцами (сверхпроводящая керамика на основе Y123, ВТСП ленты на основе Gd123, оболочки с ВТСП покрытием на основе Y123), за отчетный период успешно проведена новая серия экспериментов с использованием ленточных ВТСП на основе Gd123.

2. Продемонстрирована практическая возможность осуществить ускорение ансамбля «КТМ + ВТСП сабот» при различных запускающих импульсах (механических, электромагнитных) или под действием сил гравитации. Экспериментально продемонстрировано одновременное ускорение и левитация ВТСП сабота в поле системы «короткий соленоид + магнитный рельс», что подтверждает возможность бесконтактного ускорения ансамбля «КТМ + ВТСП сабот», и позволяет минимизировать риски деградации топливного слоя вследствие теплопритока от трения сабота о направляющую трубку инжектора, а также минимизировать риск дестабилизации траектории сабота в инжекторе.

3. Выполнено моделирование и осуществлен расчет основных параметров гибридного электромагнитного ускорителя с PMG системой типа «магнитный рельс» для различных сверхпроводящих материалов. Получены следующие расчетные параметры:

— ВТСП сабот для реакторной мишени: размер матрицы сабота – 6 x 6 x 12 мм (материал – полистирол), вес 0.432 г; размер одного ускоряемого элемента (виток из сверхпроводника MgB2) – длина 24 мм, диаметр провода 0.8 мм, масса 15 мг; ВТСП пластины для левитации сабота (материал Gd123) – размер 6 x 12 x 0.3 мм, вес 70 мг.

— Минимальная длина ускорения ансамбля «КТМ + ВТСП сабот» в электромагнитном инжекторе до скорости 200 м/с (для MgB2-driving body): от 2.5 м до 5 м (при внешнем магнитном поле от 1 Тл до 0.25 Тл, соответственно).

— Параметры, определяющие условия левитации ансамбля «КТМ + ВТСП сабот»: сила левитации ВТСП саботов, имеющих одинаковый вес (1.254 г): 0.01258 Н (для Gd123) и 0.01268 Н (для Y123); высота левитации 3 мм (для Gd123) и 5 мм (для Y123).

■ *Завершена разработка концепции системы защиты топливного слоя КТМ, как элемента технологической базы мощной лазерной установки или реактора ЛТС. Разработанная в рамках проекта концепция многоуровневой системы защиты топливного слоя в КТМ в процессе доставки, включает:*

1. Применение топливного слоя с изотропной высокодисперсной микроструктурой для снижения чувствительности топливного слоя к воздействию внешних тепловых и механических нагрузок.

2. Применение способа бесконтактной доставки ансамбля «КТМ + ВТСП сабот» (основано на применении эффекта квантовой левитации), что минимизирует риск разрушения топливного слоя в КТМ за счет теплопритоков от трения сабота о направляющую трубку инжектора и исключает риск дестабилизации траектории ансамбля «КТМ + ВТСП сабот» в инжекторе.

3. Применение конической опоры мишенного гнезда в полимерной матрице ВТСП сабота для снижения механических перегрузок, возникающих в процессе ускорения КТМ.

4. Инжекция в камеру реактора КТМ вместе с защитной крышкой из отвержденного газа, что позволяет снизить риск разрушения топливного слоя внутри КТМ под действием лобового ветра из горячих остаточных газов камеры реактора ЛТС.

5. Применение внешних покрытий КТМ-капсулы для снижения риска разрушения топливного слоя под действием излучения горячих стенок камеры реактора ЛТС, в том числе:

- Внешние защитные криогенные слои (из отвержденного  $D_2$ ,  $H_2$  или  $Xe$ )
- Внешние защитные металлические слои на основе Pd, Pt или их сплавов
- Применение двойного защитного покрытия «Металлический слой + Криогенный слой»

■ *Завершен процесс патентования результатов проекта в соответствии с заявкой на патент «Способ доставки криогенных топливных мишеней для лазерного термоядерного синтеза»: согласно уведомлению Федеральной службы по интеллектуальной собственности от 05.09.2017 г., 4 сентября 2017 г. принято решение о выдаче патента на данную заявку.*

*Таким образом, цель проекта достигнута, и все ожидаемые результаты получены. Проведено комплексное изучение процессов структурной релаксации термоядерного слоя топлива и способов минимизации рисков его деградации на всех этапах доставки КТМ в фокус мощной лазерной установки или реактора ЛТС. Определены условия формирования изотропного высокодисперсного топливного слоя внутри КТМ. Предложены оригинальные концепции инжектора с системой коррекции траектории сверхпроводящего сабота и многоуровневой системы защиты топливного слоя в КТМ. Работоспособность концепций подтверждена экспериментально. Полученные результаты позволяют создать КТМ требуемого качества и осуществить бесконтактную ее доставку в центр камеры взаимодействия с импульсом мощного лазерного излучения.*

Результаты, полученные за 2017 год, опубликованы в 2-х статьях [7, 8] и тезисах доклада [10], представленных участниками проекта на 34-й Международной (Звенигородской) конференции. Всего за 2015-2017 гг. работы над проектом опубликовано 8 статей в журналах, входящих в базы данных Web of Science и Scopus, а также в тезисах 2-х докладов, в том числе:

1. И.В.Александрова, А. А. Акунец, П. И. Безотосный, и др. О применении ВТСП лент второго поколения в системах криогенного транспорта мишеней для ИТС. Краткие Сообщения по Физике, 42 (11), 3–8, 2015; Web of Science
2. И.В. Александрова, А.А. Акунец, П.И. Безотосный, и др. О возможности создания системы бесконтактной доставки криогенных термоядерных мишеней в реактор ИТС. Краткие Сообщения по Физике, 43 (5), 15–25, 2016; Web of Science
3. И.В.Александрова, А.А. Акунец, П.И. Безотосный, и др. О формировании криогенных топливных слоев в условиях высокочастотного механического воздействия. Краткие сообщения по физике, 43 (12), 14-19, 2017; Web of Science
4. I.V.Aleksandrova, A.A.Akunets, E.R.Koresheva, et al. On the cryogenic layer formation under conditions of high-frequency mechanical action. Bulletin of the Lebedev Physics Institute, 43 (12), 352–355, 2016; Web of Science

5. И.В.Александрова, Е.Р.Корешева, Е.Л.Кошелев, и др. Криогенное водородное топливо для управляемого инерциального термоядерного синтеза (Концепция фабрики криогенных мишеней на основе метода FST). ВАНТ, сер. Термоядерный Синтез, вып. 39(1), 29–53, 2016; Scopus
6. И.В. Александрова, Е.Р. Корешева, Е.Л. Кошелев, и др. Криогенное водородное топливо для управляемого инерциального термоядерного синтеза (цилиндрические мишени для экспериментов LAPLAS). Вопросы Атомной Науки и Техники, сер. Термоядерный синтез, 39(3), 40–65, 2016; Scopus
7. I.V. Aleksandrova, A.A. Akunets, P.I. Bezotosnyi, et al. Development of hybrid transport systems for delivering cryogenic fusion targets into focus of high-power laser system or ICF reactor. J. Russian Laser Research, 38 (3), 249–264, 2017; Web of Science
8. И.В.Александрова, А.А.Акунец, Е.Р.Корешева, и др. Формирование ультрадисперсного водородного слоя при внешнем вибрационном воздействии на криогенную мишень. ВАНТ, серия Термоядерный Синтез, 40 (3), 49–62, 2017; Scopus
9. Е.Корешева. *Conception of Cryogenic Target Factory (CTF) for IFE*. 7th IAEA Technical Meeting on Physics and Technology of IFE Chambers and Targets, Vienna, Austria, March 18-20, 2015 - Устный доклад
10. И.В.Александрова, А.А.Акунец, П.И.Безотосный, И.С.Блохин, С.Ю.Гаврилкин, О.М.Иваненко, Е.Р.Корешева, Е.Л.Кошелев, К.В.Мицен, А.И.Никитенко, Л.В.Панина, Т.П.Тимашева. *Применение ВТСИ в системе инжекционной доставки криогенных мишеней*. XLIV Международная (Звенигородская) конференция по Физике Плазмы и УТС, 13–17 февраля 2017 г. <http://www.fpl.gpi.ru/Zvenigorod/XLIV/I.html#Sekcija I>

Руководитель проекта РФФИ № 15-02-02497



Корешева, д.ф.-м.н.