

УДК 621.039.(629 + 633) + 621.594

## ПРИГОТОВЛЕНИЕ ГАЗООБРАЗНОЙ ТОПЛИВНОЙ СМЕСИ С РАЗНЫМ КОЛИЧЕСТВОМ ДОБАВОК ДЛЯ ФОРМИРОВАНИЯ ИЗОТРОПНОГО КРИОГЕННОГО СЛОЯ ИЗ ИЗОТОПОВ ВОДОРОДА

*И.В. Александрова<sup>1</sup>, Е.Р. Корешева<sup>1</sup>, Т.П. Тимашева<sup>1</sup>, Л.С. Ягужинский<sup>2</sup>*

<sup>1</sup>Физический институт им. П.Н. Лебедева Российской академии наук, Москва, Россия

<sup>2</sup>Научно-исследовательский институт физико-химической биологии им. А.Н. Белозерского МГУ, Москва, Россия

Проведение широкого спектра исследований по формированию криогенного топливного слоя с изотропной микроструктурой для создания плазмы с интенсивной термоядерной реакцией является ключевым моментом при выборе реакторных технологий в программе по управляемому инерциальному термоядерному синтезу (ИТС). Для обеспечения непрерывной работы реактора ИТС необходимо пополнение топливом зоны термоядерного горения с частотой ~1 млн мишеней в сутки. Первый этап в производстве топливных мишеней — это диффузионное заполнение сферических оболочек газообразным водородным топливом (D<sub>2</sub> или D—T-смесь), после чего на внутренней поверхности оболочки формируется твёрдый сферически-симметричный криогенный слой. В ФИАН разработана оригинальная технология получения требуемой структуры твёрдого слоя за счёт скоростного охлаждения сферической оболочки с водородным топливом, в состав которого входят легирующие добавки. Этот подход позволяет сформировать ультрадисперсный криогенный слой, устойчивый в широком диапазоне температуры от 4,2 К до тройной точки используемого топливного вещества. Поскольку легирующие добавки необходимы не только для получения ультрадисперсной структуры слоя, но и для её стабилизации, то этап заполнения топливной смесью с различным количеством добавок представляет особую значимость в технологической цепочке «заполнение оболочки газообразным топливом—формирование внутри неё ультрадисперсного топливного слоя» и выделяется в отдельное направление в технологии топливных мишеней. Именно решению этой задачи и посвящена настоящая статья.

**Ключевые слова:** инерциальный термоядерный синтез, ультрадисперсный топливный слой, легирующие добавки к топливу.

## PREPARATION OF GASEOUS FUEL MIXTURES WITH DIFFERENT AMOUNT OF ADDITIVES FOR THE FORMATION OF ISOTROPIC CRYOGENIC LAYERS FROM HYDROGEN ISOTOPES

*I.V. Aleksandrova<sup>1</sup>, E.R. Koresheva<sup>1</sup>, T.P. Timasheva<sup>1</sup>, L.S. Yaguzinskiy<sup>2</sup>*

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

<sup>2</sup>*A.N. Belozersky Institute of Physico-Chemical Biology of the MSU, Moscow, Russia*

A wide range of research in the field of cryogenic layer formation with an isotropic microstructure to create plasma with an intense thermonuclear reaction is the key point in choosing reactor technologies in the program on controlled inertial fusion energy (IFE). To ensure the continuous operation of IFE reactor it is necessary to refuel the fusion zone with a rate of 1 million targets per day. Filling of spherical shells is the first step of the production process. Hydrogen fuel (D—T or D<sub>2</sub>) goes into target shell and then is layered. Standard filling technique is diffusion under gaseous fuel pressure. Here we discuss the original technology of obtaining the required fuel structure due to the high cooling rates of a spherical shell containing fuel and doping gases. This approach allows one to form an ultrafine cryogenic layer, stable in a wide temperature range — from 4.2. K to the triple point of the used fuel substance. Since doping gas is needed not only to obtain an ultrafine layer, but also to stabilize its structure, the stage of filling the doping gas in different composition and quantity is of particular importance in the production chain «fuel filling—fabrication of ultrafine cryogenic layer», and stands out in a separate direction in the fuel target technology. This article is dedicated to the solution of this problem.

**Key words:** inertial fusion energy, ultrafine cryogenic layer, doping gas.

DOI: 10.21517/0202-3822-2019-42-2-66-80

### ВВЕДЕНИЕ

Одной из центральных в ИТС является проблема устойчивости сферического сжатия при облучении мишени мощным лазерным излучением. Результаты численного анализа [1] показывают, что достиже-

ние требуемой симметрии сжатия зависит от точности изготовления лазерной термоядерной мишени и равномерности её нагрева. Например, нарушения сферичности и концентричности криогенного слоя должны быть не более 1%, а локальные неоднородности на поверхности конденсированного топлива не должны превышать 1 мкм. В работе [2] особо подчёркивается, что топливная мишень должна состоять из изотропных нанокристаллических слоёв, поскольку только в этом случае вероятность искажения фронта ударной волны в процессе имплозии мишени минимальна и эффективность сжатия максимальна.

Особенностью структуры криогенного водородного топлива, получаемого в равновесном состоянии (анизотропные молекулярные кристаллы [3]) традиционным методом  $\beta$ -layering [4], является его высокая чувствительность к изменению внешних условий, что может привести к потере качества слоя, т.е. к появлению разной толщины и шероховатости слоя сверх допустимого уровня, при доставке и позиционировании мишени в зоне облучения. Температурный градиент, возникающий за счёт нагревания при  $\beta$ -распаде трития, способствует образованию однородных слоёв, однако анизотропная поверхностная энергия способствует образованию граней.

В соответствии с результатами работы [2] необходимым условием для оптимальной реализации схемы ИТС является формирование криогенных мишеней с изотропным слоем топлива для создания плазмы с интенсивной термоядерной реакцией. Для снижения риска порчи мишени под воздействием тепловых и механических нагрузок, возникающих в процессе доставки в зону ее взаимодействия с лазерным излучением, твёрдый слой топлива должен обладать комплексом новых свойств (по сравнению с равновесным кристаллическим состоянием твёрдых водородов), таких как изотропность, термостойкость и высокая прочность [5].

Инновационное решение поставленной задачи лежит в области развития скоростных технологий формирования слоя, основанных на методе FST (аббревиатура от Free-Standing Target — свободная мишень). Метод FST, разработанный в Физическом институте им. П.Н. Лебедева (ФИАН) [6], является структурно-чувствительным и предназначен для получения твёрдых ультрадисперсных слоёв топлива из изотопов водорода и их смесей на внутренней поверхности полимерных или стеклянных оболочек (так называемых криогенных мишеней, рис. 1 и 2).

В настоящее время только метод FST обеспечивает формирование внутри движущихся сферических оболочек изотропных топливных слоёв (см. рис. 1). Это достигается, прежде всего, за счёт реализации экстремально высоких скоростей охлаждения (1—50 К/с), что позволяет получить разупорядоченные структуры с большой плотностью дефектов, т.е. изотропную среду, или так называемые ультрадисперсные слои с мелкозернистой или нанокристаллической структурой. Как показали предварительные исследования [7], стабилизация полученных неравновесных структур достигается за счёт введения в состав топлива легирующих добавок.

В данной работе представлены результаты исследований, позволившие детально разработать процедуру приготовления и тщательного контроля состава газообразной смеси «топливо + добавки» для последующего заполнения полых оболочек и формирования в них твёрдых топливных слоёв необходимого качества.

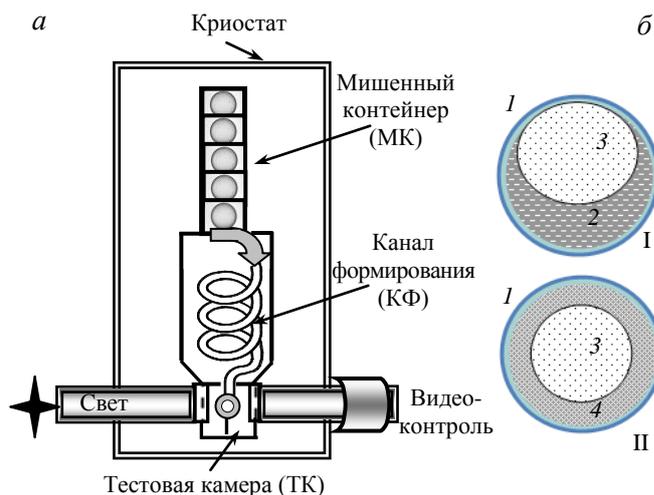


Рис. 1. FST-модуль формирования (FST-МФ) для производства ультрадисперсных слоёв топлива: *a* — схема FST-МФ; *б* — схема FST формирования слоя; I — исходная мишень (1 — полимерная оболочка, 2 — жидкое топливо, симметризация которого осуществляется при качении мишени в спиральном КФ, 3 — пар); II — готовая криогенная мишень (4 — симметричный твёрдый слой, вымораживание которого осуществляется за счёт контактной теплопроводности между движущейся оболочкой и стенкой КФ)

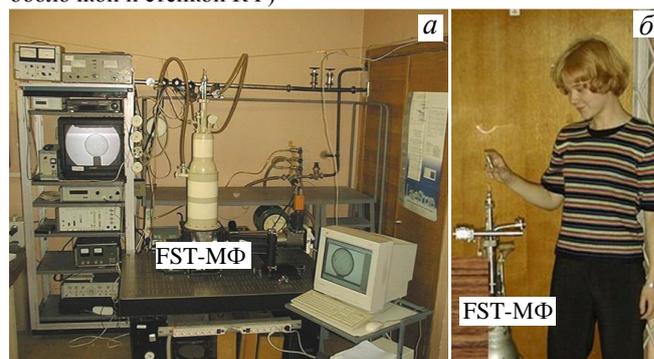


Рис. 2. Общий вид установки (*a*) и транспорт МК с заполненными оболочками от системы заполнения к FST-МФ (*б*)

## ПОДГОТОВКА ЭКСПЕРИМЕНТА

В экспериментах использовались сферические оболочки, изготовленные в ФИАН методом вспенивания [8] из газопроницаемых материалов: стекла (диаметр 0,3—0,5 мм) и полистирола (диаметр 0,8—1,0 мм) с толщиной стенки от 5 до 15 мкм.

Важным элементом установок по заполнению оболочек являются специализированные камеры за-

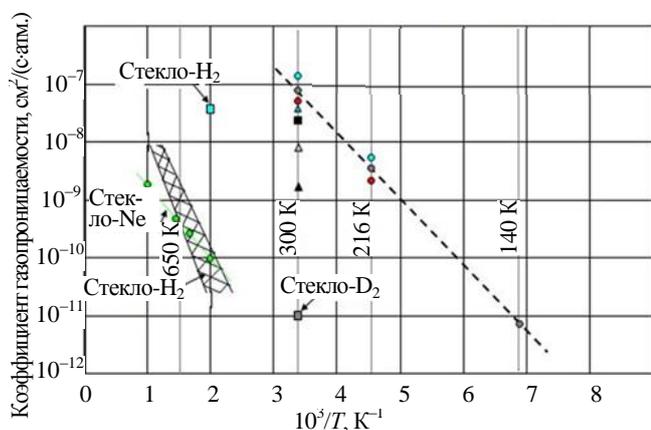


Рис. 3. Температурная зависимость коэффициента газопроницаемости полистирола и стекла: ● — полистирол — D<sub>2</sub>; ● — полистирол — H<sub>2</sub>; ● — полистирол — DT; ▲ — полистирол — H<sub>2</sub>; ■ — полистирол — N<sub>2</sub>; ▲ — полистирол — Ar; ▲ — полистирол — Xe

полнения (КЗ), внутри которых и приготавливается исследуемая газовая смесь, а также размещается катализатор (при необходимости) и массив бесподвесных оболочек, т.е. оболочек, свободно расположенных в мишенном контейнере (МК, см. рис. 1).

В силу большого различия в свойствах стеклянных и полимерных оболочек по прочности и газопроницаемости стенки режимы диффузионного заполнения для них различны. В частности, если полимерные оболочки вследствие достаточно высокого коэффициента газопроницаемости для водорода ( $K = 10^{-7}—5 \cdot 10^{-8} \text{ см}^2/(\text{с} \cdot \text{атм.})$  при 300 К) можно заполнять при комнатной температуре, то стеклянные оболочки необходимо заполнять в диапазоне температуры  $\Delta T = 200—500 \text{ }^\circ\text{C}$ , когда коэффициент газопроницаемости для водорода у стекла достаточно высок и может изменяться в зависимости от состава стекла от  $10^{-10}$  до  $5 \cdot 10^{-8} \text{ см}^2/(\text{с} \cdot \text{атм.})$  (рис. 3, данные для которого взяты из [9—16]). Контрольные эксперименты по заполнению оболочек (стеклянных до давления 120 атм. и полимерных до давления 1000 атм.) показали надёжную работу КЗ.

Основные исследования были проведены при диффузионном заполнении стеклянных оболочек на созданной в ФИАН установке, принципиальная схема и общий вид которой показаны на рис. 4. Запол-

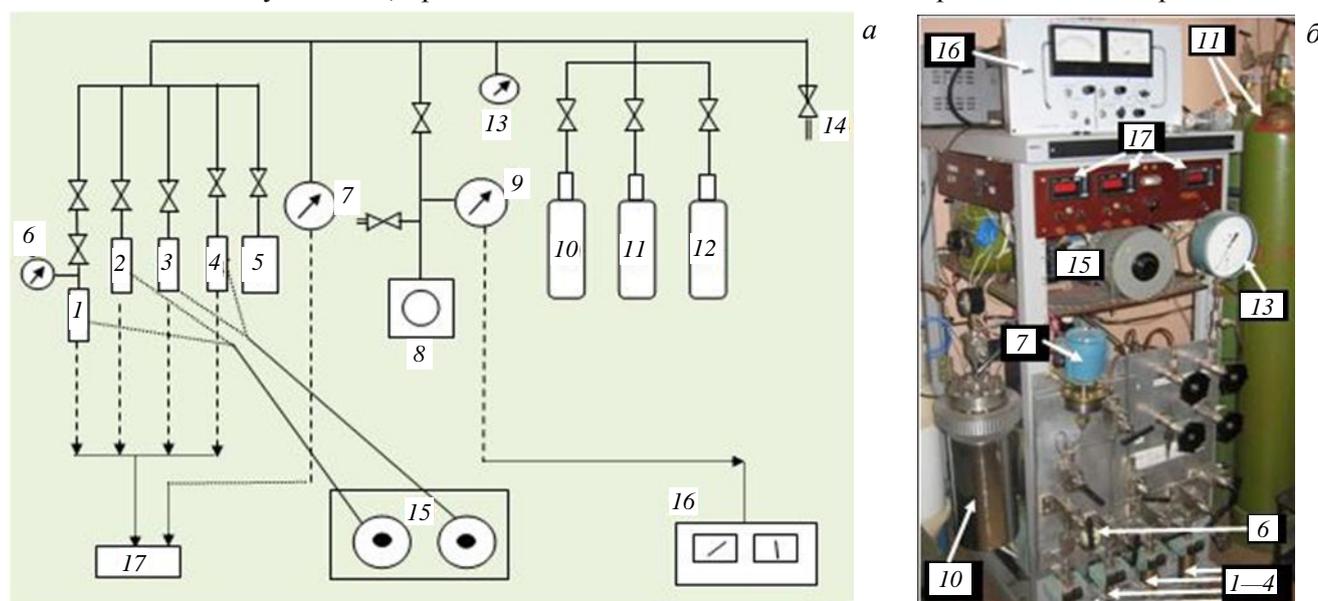


Рис. 4. Принципиальная схема (а) и общий вид (б) установки для заполнения стеклянных оболочек: 1 и 2—4 — съёмная и стационарные камеры заполнения со встроенным нагревателем (рабочий объём газа  $\sim 1 \text{ см}^3$ ); 5 — камера для взятия проб газа на масс-спектрометрический анализ; 6, 13 — стрелочные манометры; 7 — аналоговый преобразователь давления «Сапфир»; 8 — форвакуумный насос серии 2НВР-5Д; 9 — термопарный преобразователь серии ПМТ-4 для измерения уровня разрежения в системе; 10 — баллон с интерметаллическим накопителем (разработка НИИ неорганических материалов им. А.А. Бочвара), который используется как источник смеси HD/H<sub>2</sub>/D<sub>2</sub> с максимальным давлением газа 200 атм.; 11 — стандартный баллон с H<sub>2</sub> или D<sub>2</sub> (40 л, 150 атм.); 12 — стандартный баллон с неоном (5 л, 150 атм.); 14 — дренажная линия; 15 — блок автотрансформаторов; 16 — вакуумметр серии ВИТ-2; 17 — цифровой индикатор давления и температуры 2ТРМБ

нение стеклянных оболочек осуществлялось в пошаговом режиме при  $P_0 = \text{const}$ . Конечное давление достигалось за четыре шага (начальный перепад давления в каждом шаге 30 атм.). Режим заполнения рассчитывался с учётом данных по коэффициентам газопроницаемости, прочности и внешнего давления разрушения [16—19] и осуществлялся по схеме (см. рис. 4):

- МК с оболочками помещается внутрь одной из КЗ, поз. 1—4;
- насосом 8 производится вакуумирование внутреннего объёма КЗ и трубопроводов. Для удаления адсорбированной влаги с поверхности образцов, МК и внутренних поверхностей КЗ вакуумирование проводится при прогреве до 80—120 °С;
- напуск газа производится при комнатной температуре. Давление внутри КЗ контролируется датчиком 7, выдающим показания на цифровой индикатор 17. После достижения необходимого давления вентиль закрывается;
- заполнение оболочек происходит при температуре 350 °С. Рабочая температура и длительность цикла заполнения зависят от прочности и газопроницаемости стенки оболочки, т.е. от состава стекла, метода приготовления оболочек и температуры в КЗ. Температура контролируется термопарой хромель—алюмель и цифровым индикатором 17 и может варьироваться путём изменения напряжения на первичной обмотке трансформатора 15;
- по окончании цикла заполнения и остывания сосуда высокого давления до комнатной температуры газ удаляется из системы через дренажную линию 14, после чего МК с заполненными оболочками может быть извлечён для дальнейшей работы.

Основные технические характеристики установки для заполнения стеклянных оболочек:

Рабочая среда . . .	Газообразные $H_2$ , $D_2$ , их смесь или небольшие добавки инертных газов
Число оболочек, заполняемых одновременно, шт. . . .	До 60
Максимальное давление заполнения при 20 °С, атм. . . .	120
Точность определения давления, атм. . . .	$\pm 2,5$
Рабочая температура заполнения, °С . . .	200—500
Точность определения температуры, °С . . .	$\pm 2$

Установка, показанная на рис. 5, предназначена для диффузионного заполнения массива полимерных оболочек изотопами водорода до давления 30—1000 атм. при комнатной температуре (300 К). Построение установки, принцип её работы и методика заполнения полимерных оболочек газом подробно описаны в работе [16]. Установка состоит из пяти основных подсистем:

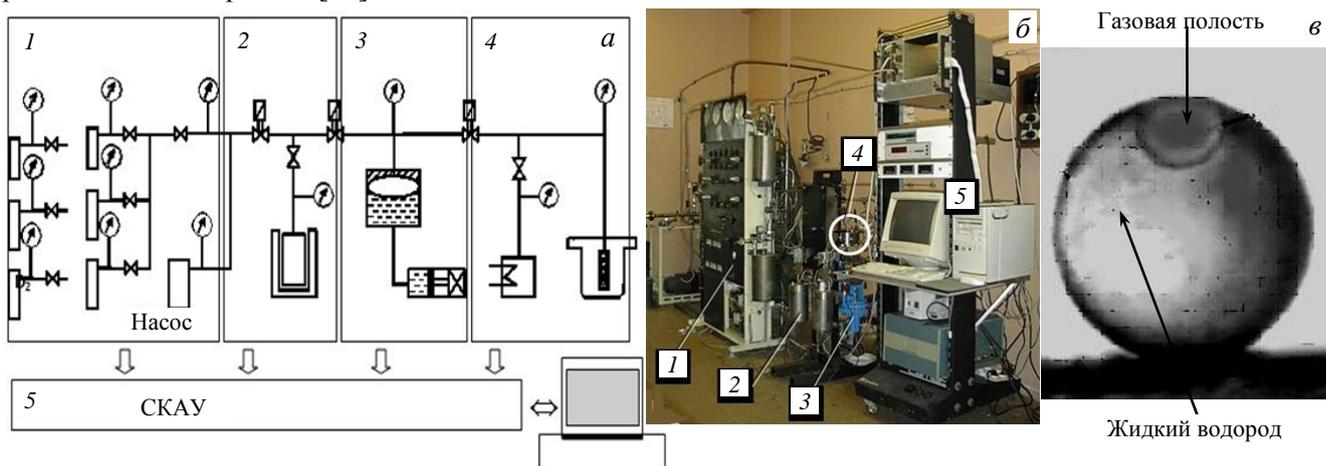


Рис. 5. Установка для заполнения полимерных оболочек до давления газа 1000 атм. при 300 К: а — схема; б — общий вид; в — результаты заполнения оболочки из полистирола до 1000 атм.; 1 — система низкого давления; 2 — система повышения давления (термокомпрессор); 3 — устройство порционной подачи газа (диафрагменный компрессор); 4 — КЗ с размещённым внутри неё МК; 5 — система контроля и автоматического управления (СКАУ)

— система низкого давления, в которую входят:

вакуумная система, которая предназначена для предварительной очистки внутренних объёмов пневматической арматуры, участков трубопроводов, камеры заполнения и пр. от остаточных газов и паров воды. Основные агрегаты вакуумной системы: форвакуумный насос 1НВП5ДМ, магнито-

электроразрядный насос, криоадсорбционный насос. Предельное остаточное давление в коллекторе вакуумной системы менее 10—2 торр;

блок первичной подачи водорода, дейтерия и их смесей в линию потребителей. Блок включает газовые баллоны, набор пневматических агрегатов, сетчатых фильтров и фильтров-адсорберов для очистки газа от механических примесей, паров воды и масла, ресивера для получения смеси  $H_2/D_2$  заданной концентрации и др.;

блок подачи инертных газов, который предназначен для подачи газообразного аргона, неона или гелия в камеру заполнения. Максимальное рабочее давление 70 атм.;

система для создания и поддержания управляющего давления, которая обеспечивает рабочее переключение электро-пневмоуправляемых клапанов. Рабочая среда — газообразный азот или воздух, содержащиеся в стандартных баллонах под давлением до 150 атм. Максимальное рабочее давление в линиях переключения  $3 \pm 0,5$  атм.;

сорбционные компрессоры, которые предназначены для обратимого хранения, очистки и подачи к потребителям рабочего тела: водорода, дейтерия, их смеси. Компрессоры изготовлены на основе интерметаллических накопителей (интерметаллид  $ZrCrFe$ ). Конструкция состоит из толстостенного цилиндра, помещённого внутри электронагревательной печи. Несколько секций цилиндра, разделённых слоями газопроницаемых металлических фильтров, содержат около 800 г диспергированного порошка  $ZrCrFe$ . Рабочий объём каждого компрессора составляет 100 нормальных литров, срок работы не менее 1000 циклов отогрева. Результаты испытаний показали [16], что при 350—400 °С давление газа в компрессоре достигает 150—200 атм. Точность подачи газа в установку составляет  $\sim 1$  атм.;

интерметаллический накопитель, изготовленный на основе титана, используется в качестве необратимого сборника отработанного рабочего тела. Конструкция содержит цилиндрический контейнер, заполненный геттером из таблетированного титана. В условиях сбора газа при 300 К это устройство обеспечивает разрежение в системе не хуже 0,1 торр;

— система повышения давления, которая представляет собой двухступенчатый термокомпрессор и обеспечивает сжатие рабочего тела до давления 580 атм. при использовании камеры первой ступени объёмом 60 см<sup>3</sup> и 720 атм. при использовании камеры второй ступени объёмом 20 см<sup>3</sup>;

— устройство порционной подачи газа в КЗ представляет собой диафрагменный компрессор, предназначенный для реализации программируемого режима сжатия рабочего тела (газа) до давления 1000 атм. Основные элементы компрессора: камера сжатия (объём 16,5 см<sup>3</sup>), электромотор (шаговые двигатели двух типов ДШ-80 и ДШ-48) и система гидравлической передачи. При построении агрегата использована капиллярная развязка в системе гидравлической передачи, что позволило уменьшить габариты и оптимизировать компоновку компрессора. Общий вес агрегата составляет 20 кг, точность подачи давления  $\sim 0,03$  атм., время службы не менее 600 циклов заполнения;

— камера заполнения, включающая также мишенный контейнер (МК). Внутри цилиндрического канала МК размещается массив незакреплённых оболочек (от 3 до 25 шт., см. рис. 1, а). Этот подход (применение МК) впервые продемонстрированный в ФИАН, является необходимым шагом в освоении реакторных технологий, поскольку он позволяет работать с массивом незакреплённых оболочек и существенно сократить временные и пространственные характеристики процесса заполнения по сравнению с общепринятым подходом, когда мишень укреплена на держателе. Миниатюрные размеры и функциональные особенности МК делают его удобным средством для транспортировки массива газонаполненных оболочек от системы заполнения в модуль FST-формирования (FST-МФ, см. рис. 2, б);

— система контроля и автоматического управления установкой обеспечивает контроль параметров установки (давление, температура, время заполнения и пр.) и управление работой диафрагменного компрессора. Система создана на базе стандартного интерфейса КАМАК. Управление осуществляется IBM-совместимым компьютером.

Установка смонтирована в рабочем помещении, обеспеченном вытяжной вентиляцией с пятикратным обменом свободного объёма в час. Общий вид установки и результаты заполнения оболочки из полистирола до 1000 атм. показаны на рис. 5, б, в.

В основу работы установки положена идея непрерывного повышения давления в КЗ таким образом, чтобы разность давлений ( $\Delta P$ ) внутри и снаружи оболочки составляла заданную величину  $\Delta P \approx \text{const}$ .

Такой режим — заполнение с постоянным градиентом давления — позволяет осуществлять процесс диффузионного заполнения полимерных оболочек за минимальное время. При этом фактическая разность между внешним и внутренним давлением на стенке оболочки не должна превышать определённой величины, задаваемой прочностью материала стенки оболочки. Последнее требует знания зависимости от времени внутреннего давления, которое является функционалом от способа или режима подачи внешнего давления. В [17—19] были проведены оптимизационные расчёты по диффузионному заполнению оболочек в режиме с постоянным градиентом давления (для полимерных оболочек) и постоянным внешним давлением (для стеклянных оболочек) для двух видов топлива — дейтерий ( $D_2$ ) и дейтерий-тритиевая смесь ( $D-T$ ). Именно эти данные использовались при эксплуатации установок для заполнения стеклянных и полимерных оболочек топливным газом с легирующими добавками.

### ПРИГОТОВЛЕНИЕ ГАЗООБРАЗНЫХ СМЕСЕЙ С ЗАДАННОЙ КОНЦЕНТРАЦИЕЙ ЛЕГИРУЮЩИХ ДОБАВОК

Далее представлены результаты исследований по получению бинарных и тройных смесей различного состава (на основе изотопов водорода, а также дейтерия с добавкой неона) и описание методики заполнения ими оболочек из стекла и полимера. Изучались следующие смеси (количество добавок дано в % от общего объёма смеси):

- смесь  $D_2/H_2$  (равнопроцентная);
- смесь  $D_2/HD/H_2$  при концентрации HD 1—10% и  $H_2 \leq 0,2\%$ ;
- смесь  $D_2/HD/H_2$  при концентрации HD 1—10% и  $D_2 \leq 0,2\%$ ;
- смесь  $H_2/HD$  при концентрации HD 0,03—0,53%;
- смесь  $D_2/Ne$  при концентрации неона 3—25%.

В зависимости от концентрации добавок применялись три различных способа получения смесей из изотопов водорода.

**Получение смесей на основе изотопов водорода с концентрацией добавки более 10%.** Смеси с концентрацией добавки более 10% создавались в отдельной камере давления, которая затем служила источником газа для диффузионного заполнения оболочек. Режим заполнения рассчитывался для компонента, обладающего наименьшим коэффициентом газопроницаемости через стенку оболочки. Температурная зависимость коэффициента газопроницаемости стекла и полистирола для различных газов представлена на рис. 3.

Приготовление смеси осуществлялось следующим образом. Сначала в камеру подаётся газ-добавка (например,  $H_2$ ), а затем из другого баллона подаётся основной газ (например,  $D_2$ ) так, чтобы конечное давление в камере  $P_2$  и давление добавки  $P_1$  удовлетворяли соотношению

$$P_1/P_2 = x, \quad (1)$$

где  $x$  — концентрация добавки. При работе с равнопроцентной смесью  $D_2/H_2$  необходимо было учитывать вероятность появления третьего компонента (HD), возникающего вследствие реакции изотопного обмена:



Интенсивность процессов изотопного обмена зависит от наличия определённого катализатора в системе и от температуры газа. Константа равновесия  $k$  реакции (2) меняется от  $k = 4,0$  при высоких температурах (~2000 К) и до  $k = 0$  при абсолютном нуле. Это означает, что при высоких температурах молекула HD термодинамически неустойчива. Из работы [20, с. 210] следует, что равновесный состав смеси  $H_2 + D_2 = 2HD$  при  $T = 50$  °С (константа равновесия  $k = 3,3$ ) при содержании в смеси атомов дейтерия, равном 50% (по объёму), составляет 26,2%  $H_2$ , 47,5% HD, 26,2%  $D_2$ .

Энергия активации реакции (2) состоит из энергии, необходимой для образования атома, и из энергии, необходимой для взаимодействия между атомом и молекулой, в соответствии со следующими двумя реакциями:





Кинетика реакции (2) при различных температурах была изучена в [20]. На рис. 6, построенном на основании данных этой работы, приведена температурная зависимость времени половинного превращения (при давлении 10 торр) равнопроцентной смеси  $\text{D}_2/\text{H}_2$  в тройную смесь  $\text{D}_2/\text{HD}/\text{H}_2$ . Как следует из рисунка, время превращения при комнатной температуре может составлять более двух лет, в то время как при температуре  $350^\circ\text{C}$  характерное время превращения составляет всего около 15 мин.

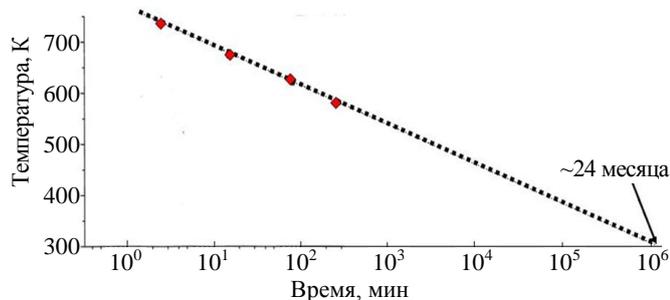


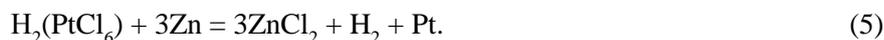
Рис. 6. Температурная зависимость половинного времени установления равновесия в реакции  $\text{D}_2 + \text{H}_2 \leftrightarrow \text{HD}$

реально также является трёхкомпонентной смесью. Для этих исследований, наоборот, удобно воспользоваться стеклянными (а не полимерными) оболочками, так как необходимый состав трёхкомпонентной смеси будет образовываться в процессе заполнения при  $350^\circ\text{C}$ .

**Получение смесей на основе изотопов водорода с концентрацией HD 1—10%.** Данная методика основана на адсорбционных свойствах платины по отношению к изотопам водорода. Платиновая чернь — порошок чёрного цвета, применяемый как катализатор в химических процессах. Известно, что водород хорошо растворим в палладии (Pd) и платине (Pt). Однако если в случае Pd водород эффективно взаимодействует со всем объёмом образца (до 850 объёмов водорода на 1 объём Pd), то взаимодействие с Pt происходит в тонком приповерхностном слое. Поэтому особо подчеркнём, что степень поглощения водорода платиной сильно зависит от степени дисперсности и предварительной обработки металла. При комнатных температурах такое поглощение невелико даже у мелкодисперсного образца и практически отсутствует у компактного. Для того чтобы повысить адсорбционную ёмкость и каталитическую активность Pt, её приготавливают в виде порошка, так называемой платиновой черни.

Адсорбционная ёмкость платины по отношению к водороду возрастает при повышении температуры [21]. Это означает, что на поверхности происходит процесс хемосорбции водорода с образованием двухатомных молекул PtH. Энергия связи атомов в молекуле PtH составляет  $\sim 3$  эВ (или  $\sim 112$  ккал) [22]. При температуре  $T \geq 300$  К платина является хорошим катализатором процессов изотопного обмена, орто-пара конверсии молекул  $\text{H}_2$  и  $\text{D}_2$  и пр.

Мы провели исследования адсорбционной ёмкости порошка платиновой черни по отношению к  $\text{H}_2$  и  $\text{D}_2$ . Порошок был изготовлен методом восстановления раствора  $\text{H}_2(\text{PtCl}_6)$  металлическим цинком в соответствии с уравнением



Характерный размер частиц порошка платиновой черни в среднем составлял 50—100 мкм, что полностью определялось поставщиком. Поскольку образец платины, приготовленный таким образом, обладает от 20 до 200 раз более развитой поверхностью, чем компактный образец платины той же массы, то соответственно возрастает и количество адсорбированного газа. В КЗ (одну из четырёх камер, показанных на рис. 3), выполненную из нержавеющей стали, помещался порошок платиновой черни в количестве от 50 до 100 мг. Затем КЗ вакуумировалась при прогреве её стенок до температуры  $T \sim 80$ — $100^\circ\text{C}$ , чтобы очистить поверхность металла от адсорбированных газов и молекул воды. После вакуумной очистки в КЗ подавался газообразный  $\text{H}_2$  до давления 25—30 атм. Система газ + Pt выдерживалась при  $T \sim 340$ — $370^\circ\text{C}$  в течение 5 ч, после чего камера охлаждалась до комнатной температуры, и внутри неё создавалось разрежение  $\sim 1$  торр. Затем в КЗ подавался газообразный  $\text{D}_2$  (60 атм. при 300 К),

система  $D_2 + Pt$  нагревалась и выдерживалась при  $T \sim 340\text{—}370\text{ }^\circ\text{C}$  в течение нескольких дней. После этого специальным пробником из камеры отбиралась проба газа, и проводился масс-спектрометрический анализ его состава. Обнаружено, что в составе газа, кроме дейтерия, появляется заметное количество молекул HD (1—10%), а также некоторое количество молекул  $H_2$  (0,1—0,2%). Образование такого состава происходит в соответствии с реакциями замещения



Аналогичные результаты получены при насыщении порошка платины дейтерием с последующим выдерживанием насыщенной платины в атмосфере водорода при повышенных температурах. В этом случае получается смесь  $H_2$  (90—95%), HD (1—10%) и  $D_2$  (менее 1%).

Измерение состава смеси производилось на статическом двухкаскадном масс-спектрометре МИ3305, созданном во ВНИИНМ им. А.А. Бочвара для прецизионного контроля изотопного и химического анализа водородно-гелиевых смесей [23, 24]. Предел обнаружения присутствия изотопов водорода в смеси с помощью указанного масс-спектрометра составляет 0,01% для  $H_2$  и  $D_2$ , 0,02% для HD-смеси, 0,005% для изотопов гелия.

В табл. 1 приведены составы полученных смесей, которые были использованы для заполнения оболочек из стекла и последующего вымораживания внутри них криогенного слоя.

Т а б л и ц а 1. Результаты анализа проб смесей газов, полученных адсорбционной методикой (способ 2)

Эксперимент	$H_2$ , %	HD, %	$D_2$ , %	Примеси ( $N_2$ , $CO$ , $O_2$ и др.), менее, %
Эксперимент № 1, состав исходного газа	99,70	<0,015	<0,015	0,3
Смесь, полученная в камере 3	90,60	$8,9 \pm 0,1$	$0,2 \pm 0,1$	0,3
Эксперимент № 2, состав исходного газа	<0,01	0,4	99,2	0,3
Смесь, полученная в камере 1	<0,1	$5,85 \pm 0,15$	$93,75 \pm 0,15$	0,3
Смесь, полученная в камере 2	<0,1	$4,95 \pm 0,35$	$94,65 \pm 0,4$	0,3
Смесь, полученная в камере 3	<0,1	$9,9 \pm 0,1$	$89,7 \pm 0,1$	0,3
Эксперимент № 3, состав исходного газа	<0,01	0,4	99,3	0,3
Смесь, полученная в камере 1	<0,1	5,0	94,6	0,3
Эксперимент № 4, состав исходного газа	<0,05	0,8	99,2	0,5
Смесь, полученная в камере 1	<0,05	1,8	98,2	0,5
Смесь, полученная в камере 2	<0,05	3,5	96,5	0,5

Примечание: различие проб в различных камерах обусловлено тем, что степень поглощения водорода платиной сильно зависит от степени дисперсности (размера частиц) исходного порошка платины.

**Получение смесей на основе изотопов водорода с концентрацией HD менее 1%.** Смесей  $H_2$ /HD, в которых количество добавки HD составляло менее 1%, приготавливались по оригинальной методике, разработанной авторами. Далее дано описание экспериментальных результатов, на основании которых и была разработана методика.

Образец платины, приготовленный в виде порошка платиновой черни с характерным размером гранул 50—100 мкм, выдерживался в герметичной камере в атмосфере  $H_2$  (примеси тяжёлых изотопов водорода составляли менее 0,01%) при давлении газа 50—120 атм. и температуре 200—500 °C в течение нескольких дней. Сжатый  $H_2$  отбирался из стандартного газового баллона (150 атм., 40 л). Кроме того, в камеру помещались полые тонкостенные оболочки из стекла (диаметр 0,4—0,8 мм, толщина стенки 10—20 мкм), а также диагностические сплошные микрошарики из стекла с добавкой кобальта (диаметр 0,2—0,4 мм), изготовленные в ФИАН [8]. В процессе эксперимента происходило диффузионное заполнение оболочек газом, находящимся в камере. Для анализа состава и свойств исследуемых веществ до и после проведения эксперимента применялись следующие методы контроля:

— качественный визуальный анализ цвета кобальтосодержащих стеклянных шариков до и после эксперимента с целью обнаружения прохождения атомов водорода в объём образца;

— исследование температуры плавления и замерзания (температуры тройной точки) продифундировавшего внутрь оболочек вещества проводилось на установке для формирования криогенных мишеней, созданной в ФИАН и оснащённой необходимой аппаратурой для визуального и температурного контроля (см. рис. 1 и 2, а также [6]);

— изучение элементного состава газа до и после эксперимента проводилось на масс-спектрометре ТРИТОН во ВНИИНМ им. А.А. Бочвара. Чувствительность прибора для изотопов водорода составляла 0,05% от объёма;

— исследование инфракрасных спектров оболочек, диффузионно заполненных водородом в отсутствие и в присутствии платиновой черни, проводилось на ИК-спектрографе в НИИФХБ им. А.Н. Белозерского МГУ.

Сравнительный анализ образцов позволил обнаружить следующее:

— визуальный осмотр кобальтосодержащих стеклянных шариков до и после эксперимента обнаружил изменение цвета шариков при их выдерживании в атмосфере  $H_2$  в присутствии платиновой черни (рис. 7). В отсутствие в камере Pt (при прочих равных условиях) изменения цвета шариков не зафиксировано. Полученные данные могут свидетельствовать об образовании в присутствии Pt атомарного водорода и его проникновении вглубь стеклянного шарика. При этом происходит изменение валентности кобальта под воздействием водорода по схеме  $Co^{+5} \leftrightarrow Co^{+3}$ , в результате чего изменяется цвет образца;

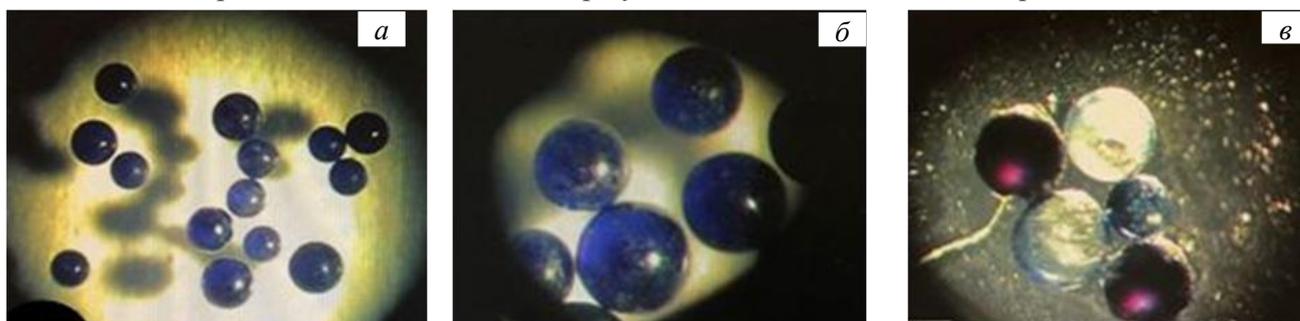


Рис. 7. Изменение цвета кобальтосодержащих стеклянных шариков при их выдерживании в атмосфере водорода в присутствии платиновой черни (Pt): *a* — массив исходных образцов; *б* — образцы, выдержанные в атмосфере водорода в отсутствие Pt; *в* — образцы, выдержанные в атмосфере водорода в присутствии Pt

— криогенные исследования показали повышение температуры плавления отработанного газа по сравнению с исходным водородом. Метод определения температуры плавления заключался в следующем. Тонкостенные оболочки из стекла заполнялись газом методом диффузии (в присутствии и в отсутствие платины в камере заполнения), после чего оболочки помещались в оптическую камеру гелиевого криостата и охлаждались в парах жидкого гелия до тех пор, пока водород не переходил в твёрдую фазу.

Внутри оптической камеры находился теплообменный гелий под давлением  $\sim 30$  торр, что позволяло минимизировать градиент температуры на поверхности оболочки в процессе эксперимента, а также обеспечивало возможность измерения температуры оболочки с помощью датчика,

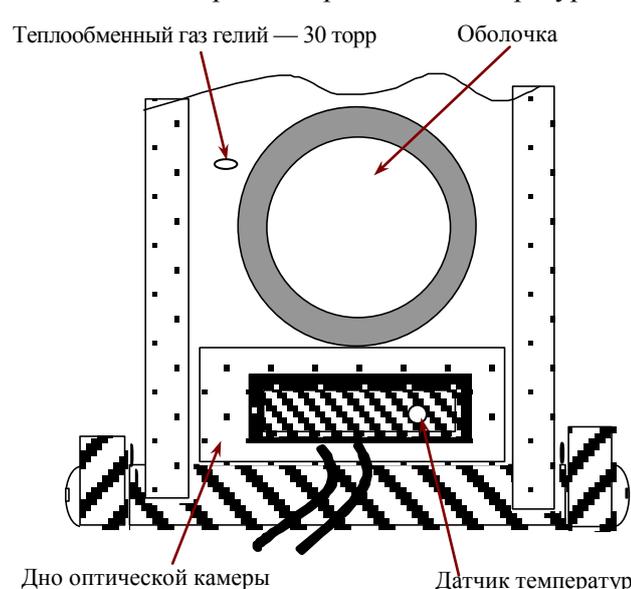


Рис. 8. Схема размещения оболочки и датчика температуры в оптической камере гелиевого криостата

вмонтированного в дно оптической камеры (см. схему на рис. 8). Измерение температуры осуществлялось с помощью миниатюрного бескорпусного полупроводникового датчика сопротивления, точность измерения температуры составляла  $\pm 0,05$  К (в пределах температуры 4,2—20 К). Размер датчика ( $\sim 0,5$  мм<sup>3</sup>) был сопоставим с размером оболочек.

Наблюдения за процессами, происходящими внутри оболочек, размещённых в оптической камере, осуществлялись с помощью видеосистемы серии МАТРИЦА-430к/12 (производство фирмы «ДельтаТех», научный парк МГУ). Пространственное разрешение системы составляло 2,5 мкм (для видимого спектра), временное разрешение 40 мс.

Температура «плавления—отвердевания» водорода внутри оболочек стабильно регистрировалась в десятках экспериментов и с точностью погрешности измерения  $\pm 0,05$  К соответствовала табличному значению 13,96 К. При заполнении оболочек

водородом в присутствии платины обнаружено, что температура «плавления—отвердевания» увеличивается. Соответствующие экспериментальные данные приведены в табл. 2 (см. также рис. 9). Для сравнения в табл. 3 даны тройные точки для всех изотопов водорода, взятые из работы [25]. Повышение температуры плавления является косвенным свидетельством появления в составе протия тяжёлых изотопов водорода, например, молекул D<sub>2</sub> и HD;

— масс-спектрометрические исследования состава газа до и после нагрева системы «газ + платина» подтвердили данные криогенных экспериментов. Анализ показал появление элементов третьей массы (молекул HD) в количест-

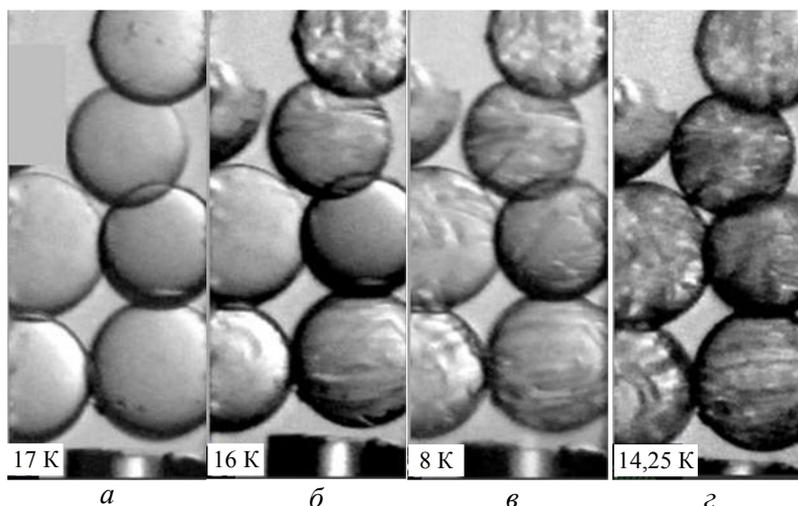


Рис. 9. Кристаллизация H<sub>2</sub> при температуре 16 К при охлаждении стеклянных оболочек в парах гелия (давление гелия 30 торр). Оболочки заполнены H<sub>2</sub> методом диффузии в присутствии Pt

Т а б л и ц а 2. Температура плавления водорода внутри оболочек, заполненных в присутствии Pt

Температура плавления, К			
оболочка № 1 (см. рис. 9)	оболочка № 2	оболочка № 3	оболочка № 4
14,1	14,3	14,3	14,3

Т а б л и ц а 3. Температура тройной точки изотопов водорода T<sub>тр</sub>, К

Изотоп					
H <sub>2</sub>	HD	D <sub>2</sub>	HT	DT	T <sub>2</sub>
13,96	16,6	18,65	18,5	19,71	20,6

ве 0,03—0,56% от общего объёма газа уже через несколько дней нагрева системы «газ + Pt» (табл. 4). Поскольку температура плавления HD выше, чем H<sub>2</sub> (см. табл. 3), то наличие молекул HD в смеси с водородом может приводить к повышению температуры плавления. Отметим, что при заполнении камеры газообразным дейтерием (вместо водорода) в системе «газ + Pt» было зафиксировано образование молекул HD в количестве 1,8—3,5% и малое количество H<sub>2</sub> < 0,05% в составе отработанного газа (см. табл. 2, последняя строка). Этот результат является вполне ожидаемым, поскольку в ходе реакции (5) происходит адсорбция водорода на поверхности платиновой черни, а затем в соответствии с реакциями (6), (7) в газе появляются молекулы H<sub>2</sub> и HD;

Т а б л и ц а 4. Результаты анализа проб смесей газов, полученных способом № 3

Эксперимент	H <sub>2</sub> , %	HD, %	D <sub>2</sub> , %	Примеси (N <sub>2</sub> , CO, O <sub>2</sub> и пр.), менее, %
Эксперимент № 1, состав исходного газа	99,90	Не обнаружено	Не обнаружено	0,10
Смесь, полученная в камере 1	99,29	0,56 ± 0,11	0,15 ± 0,11	0,10
Эксперимент № 2, состав исходного газа	99,90	Не обнаружено	Не обнаружено	0,20
Смесь, полученная в камере 1	99,47	0,53 ± 0,11	Не обнаружено	0,20
Эксперимент № 3, состав исходного газа	99,75	Не обнаружено	Не обнаружено	0,25
Смесь, полученная в камере 1	99,45	0,30 ± 0,10	Не обнаружено	0,25
Эксперимент № 4, состав исходного газа	99,90	Не обнаружено	Не обнаружено	0,10
Смесь, полученная в камере 1	99,61	0,03 ± 0,01	Не обнаружено	0,36
Эксперимент № 5, состав исходного газа	99,90	Не обнаружено	Не обнаружено	0,10
Смесь, полученная в камере 1	98,58	0,15 ± 0,05	Не обнаружено	1,27
Эксперимент № 6, состав исходного газа	99,70	Не обнаружено	Не обнаружено	0,30
Смесь, полученная в камере 1	99,94	0,06 ± 0,02	Не обнаружено	0,10
Смесь, полученная в камере 2	99,95	0,04 ± 0,02	Не обнаружено	0,10
Смесь, полученная в камере 4	99,95	0,03 ± 0,02	Не обнаружено	0,02
Эксперимент № 7, состав исходного газа	99,93	Не обнаружено	Не обнаружено	0,07
Смесь, полученная в камере 4	99,88	0,11 ± 0,01	Не обнаружено	0,01
Эксперимент № 8, состав исходного газа	99,92	Не обнаружено	Не обнаружено	0,08
Смесь, полученная в камере 1	98,70	0,20 ± 0,01	Не обнаружено	1,10

Примечание: различие проб в различных камерах обусловлено тем, что степень поглощения водорода платиной существенно зависит от степени дисперсности (размера частиц) исходного порошка платины.

— спектральные исследования показали, что в инфракрасных спектрах оболочек, диффузионно заполненных водородом в отсутствие платины, наблюдается широкая полоса с максимумом в области  $3400\text{ см}^{-1}$ , которая соответствует в спектре колебаниям О—Н-связи. В оболочках, заполненных газом в присутствии платины, эти особенности отсутствуют. Вероятной причиной эффекта является замещение атомов водорода атомами дейтерия с образованием О—D-связи.

Итак, результаты экспериментов по измерению температуры плавления криогенного слоя, масс-спектрометрического анализа газа и спектрального анализа материала оболочек позволили:

- установить, что водород в системе может находиться в атомарной форме;
- достоверно зарегистрировать появление значительного количества тяжёлого водорода (0,03—0,56% об.) в составе отработанного протия.

Кроме того, следует отметить тот факт, что в присутствии водорода атомы платины приобретают способность перемещаться по поверхности. Об этом достоверно свидетельствуют экспериментальные наблюдения, проведённые в работе [26] с помощью электронного микроскопа.

На основании данных сравнительного анализа можно констатировать следующее. Водород в условиях эксперимента вступает в контакт со всей поверхностью образца платины, так как происходит его адсорбция на развитой поверхности порошка платиновой черни. В условиях опыта оба элемента — водород и платина частично находятся в атомарном состоянии. Образование атомов платины сопровождается возникновением дефектов в кристаллической решётке образца в приповерхностном слое. Это явление способствует возникновению заряженных нуклонов (протонов) из атомарного водорода. Таким образом, в системе водород—платина образуются ядерные частицы (протоны) и происходит предельное в масштабах химической связи сближение реагирующих элементов, т.е. создаются необходимые предпосылки для протекания ядерных реакций. Этим можно объяснить появления тяжёлого водорода (0,03—0,56% об.) в составе отработанного газа. Впрочем, обсуждение этого вопроса выходит за рамки задачи, поставленной в данной работе, — разработать методику получения водородных смесей с различной концентрацией добавок.

Итак, для получения смесей  $\text{H}_2/\text{HD}$  с добавкой HD менее 1% необходимо выполнить следующую последовательность операций:

- поместить порошок платиновой черни в КЗ, туда же поместить контейнер с оболочками из стекла;
- заполнить оболочки газообразным  $\text{H}_2$  согласно изложенной процедуре.

При температуре заполнения  $T \sim 350\text{ °C}$  в системе появляются добавки HD в количестве 0,03—0,53%, и одновременно оболочки диффузионно заполняются образовавшейся смесью. Количество образующейся добавки может быть различным от опыта к опыту. Поэтому после завершения процедуры заполнения оболочек и охлаждения КЗ до комнатной температуры из неё отбиралась проба газа для анализа его химического и изотопного состава на масс-спектрометре ТРИТОН.

Кроме того, проба газа для анализа на масс-спектрометре бралась из КЗ до начала процедуры заполнения. Полученные результаты сравнивались, после чего можно было констатировать появление новых элементов в составе отработанного газа. В табл. 4 приведены составы смесей, полученные данным методом и использованные в экспериментах по формированию криогенного слоя.

**Получение смесей  $\text{D}_2$  с Ne с концентрацией добавки неона 3—25%.** Технология получения смеси  $\text{D}_2/\text{Ne}$  совпадает с технологией получения смесей на основе изотопов водорода при концентрации добавки более 10%. Неон был выбран в качестве добавки к дейтерию для моделирования экспериментов по формированию ультрадисперсного слоя из смеси D—T, в которой тритий может играть роль высокоплавкой легирующей добавки.

## ФОРМИРОВАНИЕ УСТОЙЧИВОГО УЛЬТРАДИСПЕРСНОГО КРИОГЕННОГО СЛОЯ

Ранее нами был проведён цикл экспериментальных исследований влияния различных добавок на формирование и температурную устойчивость ультрадисперсного криогенного слоя из водорода и дейтерия [7].

В настоящее время мы провели дополнительные исследования, увеличив количественный диапазон изменения легирующих добавок. Скорость охлаждения топлива в мишени является ключевым фактором при формировании криогенных слоёв с заданной структурой топлива и, следовательно, зависит от метода формирования, т.е. способа отвода тепла от мишени. В новой серии экспериментов, как и в преды-

дущем цикле [7], криогенный слой формировался методом FST при скорости охлаждения в диапазоне от 1 К/мин до 100 К/с (рис. 10—12). Условия эксперимента: давление заполнения смесью газов 40—300 атм. при 300 К, основной компонент смеси  $H_2$  или  $D_2$  (50—99,9% по объёму), легирующие ком-

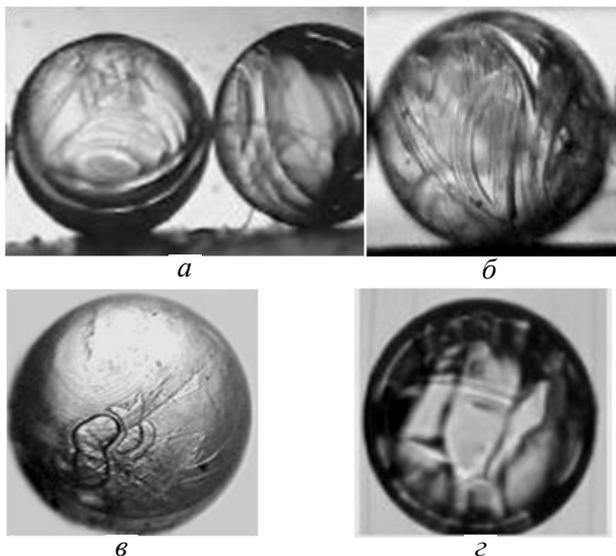


Рис. 10. Характерные структуры поликристаллического криогенного слоя, полученные при низких скоростях охлаждения  $q \sim 1$  К/мин при  $T = 4,2$  К:  $H_2$  (а);  $H_2 + D_2$  (50:50) (б);  $H_2 + 5\%$  HD(в);  $D_2$  (г)

поненты смеси HD (0,03—20%),  $D_2$  (1—50%),  $H_2$  (1—50%), Ne (3—25%), способ охлаждения топливной смеси — теплоотвод через пятно контакта при реализации метода FST.

Проведённые исследования показали, что ультрадисперсный криогенный слой, устойчивый при нагреве от 5 К до температуры тройной точки  $T_{тр}$  основного компонента, можно сформировать при следующих условиях:

- скорость охлаждения оболочки со смесью варьируется в пределах  $q = 1—50$  К/с;
- количество легирующей добавки варьируется в пределах от  $\xi_{\min} = 0,03—0,5\%$  до  $\xi_{\max} = 25\%$ ;
- легирующая добавка должна иметь температуру тройной точки  $T_{тр}$  выше, чем у основного компонента смеси.

Рис. 10—12 иллюстрируют влияние перечисленных условий на структуру и качество криогенного слоя. В частности, эксперименты показали:

- устойчивый ультрадисперсный слой на основе  $H_2$  ( $T_{тр} = 13,9$  К) может быть сформирован методом FST при использовании в качестве добавки следующих веществ: HD ( $T_{тр} = 16,6$  К),  $D_2$  ( $T_{тр} = 19,7$  К), Ne ( $T_{тр} = 24,54$  К);
- устойчивый ультрадисперсный слой на основе  $D_2$  ( $T_{тр} = 19,7$  К) может быть сформирован методом FST при использовании в качестве добавки Ne ( $T_{тр} = 24,54$  К). Если в качестве добавки использовался  $H_2$  ( $T_{тр} = 13,9$  К) или HD ( $T_{тр} = 16,6$  К), формируемый ультрадисперсный слой был неустойчив и при нагреве выше 6—8 К кристаллизовался за несколько секунд. В этих экспериментах Ne также играл роль добавки (исследован диапазон от 3 до 25%), моделирующей тритий. На основании полученных

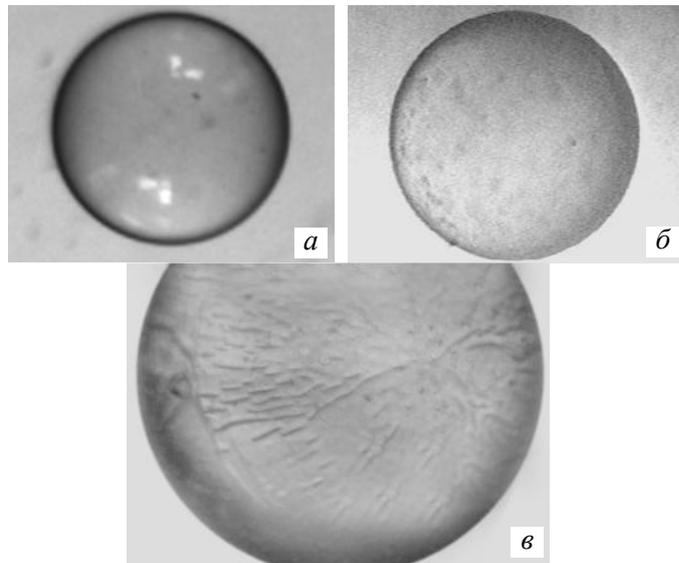


Рис. 11. Формирование криогенного  $H_2$ -слоя при высоких скоростях охлаждения ( $q > 100$  К/с) без использования легирующих добавок к основному компоненту: а — исходная оболочка при  $T = 300$  К; б — криогенный  $H_2$ -слой после формирования при  $T = 4,2$  К; в — последующая рекристаллизация  $H_2$ -слоя при нагреве оболочки до  $T = 6,5$  К (дано с увеличением)

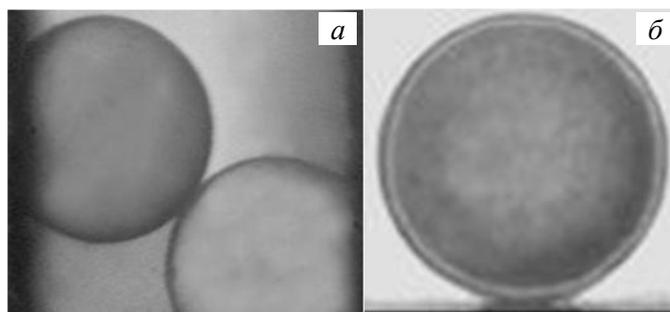


Рис. 12. Прозрачный ультрадисперсный криогенный слой, сформированный методом FST при температуре  $T = 4,2$  К внутри полимерной оболочки при скорости охлаждения  $q = 8$  К/с. Компоненты слоя: а — 80%  $D_2$  и 20% Ne в качестве высокоплавкой добавки; б —  $D_2$  и 3% Ne. Здесь неон (Ne) выбран в качестве высокоплавкой добавки к топливу. В обоих случаях рекристаллизация слоя не наблюдалась в процессе нагрева оболочек в диапазоне температуры от  $T = 4,2$  К до тройной точки основного компонента дейтерия  $T_{тр} = 18,7$  К

данных можно заключить, что тритий ( $T_{\text{тр}} = 20,6 \text{ К}$ ) может играть роль высокоплавкой легирующей добавки в топливной D—T-смеси, имеющей как стандартную эквимольную композицию, так и пониженное содержание трития в смеси. Это означает, что метод FST перспективен при формировании устойчивых ультрадисперсных D—T-слоёв внутри мишеней реакторного класса.

В настоящее время развитие технологий на основе метода FST осуществляется в рамках программы по созданию частотного модуля FST-МФ для мишеней реакторного класса, а также программы по созданию систем бесконтактного позиционирования и транспорта готовой криогенной мишени в фокус мощной лазерной установки или реактора ИТС [27, 28].

Следует отметить ещё одно важное обстоятельство. Стоимость мишеней является основным фактором, который определяет экономику энергетической станции на базе ИТС [29]. Использование легирующих добавок позволяет перейти к реализации условий, отвечающих практическому созданию новой технологии. Это связано с тем, что формирование прозрачных криогенных слоёв требуемого качества без использования добавок возможно лишь при достижении очень высоких скоростей охлаждения ( $q > 100 \text{ К/с}$ , см. рис. 11). Для реализации надёжной и дешёвой технологии поточного производства криогенных мишеней необходимо снизить скорости охлаждения на 1,5—2 порядка. Именно это и позволяют сделать легирующие добавки к топливу (см. рис. 12).

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Объектом исследования является криогенная мишень, т.е. полая сферическая оболочка и расположенный на её внутренней стенке прозрачный криогенный слой из твёрдого изотопа водорода или его смеси с добавками других веществ, стимулирующих формирование требуемой структуры топлива и её устойчивости по отношению к тепловым и механическим нагрузкам.

Первый шаг при создании любой мишени — это заполнение оболочки газообразным топливом. Поэтому особое внимание в работе было уделено именно этому этапу. Полный цикл формирования мишени включает следующие стадии (см. рис. 1—3, 5):

- приготовление требуемой газообразной смеси, включающей основной компонент — топливо и легирующие добавки, с последующим заполнением оболочек полученной смесью;
- транспортировка заполненных оболочек в модуль FST-формирования слоя;
- формирование криогенных слоёв с заданной микроструктурой топлива.

В результате проведённых исследований была разработана технология получения газообразных смесей водородного топлива с легирующими добавками в количестве от 0,03—0,5% до 25% по объёму.

Экспериментально доказано, что введение определённых добавок в водород или дейтерий на стадии заполнения оболочки газом позволяет стабилизировать метастабильное ультрадисперсное состояние топлива, получаемое при быстром охлаждении мишени, и расширить область его температурного существования вплоть до тройной точки основного компонента. Качество слоя зависит от величины и состава используемых добавок, причём температура их плавления должна быть выше температуры плавления основного компонента. К ним относятся изотопы водорода с более высокой тройной точкой, чем основное топливо, а также неон. Только в этом случае возникает прозрачный слой, устойчивый к нагреву.

Обобщая полученные результаты, подчеркнём следующее:

- изучены особенности получения бинарных и тройных смесей типа  $D_2/H_2$  и  $D_2/HD/H_2$  при содержании добавок к основному компоненту в смеси от 1—10% до 50%;
- экспериментально обнаружен эффект возникновения малых легирующих добавок HD в системе «водород + платиновая чернь». На основании этого эффекта разработана оригинальная методика получения бинарной смеси  $H_2/HD$  при содержании HD 0,03—0,56%;
- проведены эксперименты по вымораживанию смеси дейтерия с различным процентным содержанием неона (от 3 до 25%), который моделирует в этих экспериментах тритий. Цель — показать перспективность метода FST при работе с D—T-смесью в стандартной эквимольной композиции, а также с пониженным содержанием трития в смеси;
- экспериментально показано (см. рис. 10), что при низких скоростях охлаждения формируются характерные поликристаллические структуры криогенного слоя, как для чистых изотопов водорода, так и для их смесей;

— экспериментально показано (см. рис. 11 и 12), что наличие добавок снижает требуемую скорость охлаждения топлива внутри оболочки от 100 К/с (чистые изотопы водорода) до 1—50 К/с (изотоп + легирующая добавка). Следует отметить, что криогенные слои из чистых изотопов водорода даже при скорости охлаждения 100 К/с, неустойчивы и подвержены рекристаллизации при нагреве мишени (см. рис. 11);

— принимая во внимание степень анизотропии в величине скорости звука (для водорода и дейтерия эта величина составляет около 20% (продольный звук) и 33% (поперечный звук) [3]), получение изотропного твёрдого топлива является необходимым условием проведения успешных экспериментов по сжатию мишеней и достижению условий для эффективного зажигания топлива. В этом контексте использование высокоплавких добавок к топливу при реализации метода FST — прекрасный инструмент для формирования устойчивых изотропных ультрадисперсных криогенных слоёв и может служить основой для развития реакторных технологий.

Таким образом, определены условия и созданы установки для подготовки объекта исследования — полый сферической оболочки с топливным газом к этапу формирования твёрдого криогенного слоя в изотропном ультрадисперсном состоянии. Возможность вариации состава газа внутри оболочек позволила изучить влияние различных добавок на структуру и свойства криогенного слоя. Реализация этого подхода позволит в дальнейшем перейти к этапу формирования методом FST устойчивого изотропного криогенного слоя в мишенях реакторного класса, что является инновационной технологией для получения требуемой структуры топлива и генерации плазмы с интенсивной термоядерной реакцией [30, 31].

Работа выполнена в рамках проектов РФФИ № 15-02-02497, МАГАТЭ № 20344, а также в рамках ГЗ ФИАН.

Авторы благодарны И.Е. Осипову за участие в подготовке и проведении экспериментов.

#### REFERENCES

1. Afanas'ev Yu.V., Volosevich P.P., Gamaliy E.G., Krokhin O.N. et al. — Pis'ma v ZhETF (Letters to JETPh), 1976, vol. 23, issue 8, p. 470 (in Russian).
2. Bringa E.M., Caro A., Victoria M. et al. Atomistic modeling of wave propagation in nanocrystals. — J. Minerals, Metals and Materials Soc., 2005, vol. 57, № 9, p. 67.
3. Wanner R., Meyer H. Sound velocity in solid hydrogen and deuterium. — Physics Letters, 1972, vol. A 41, № 3, p. 189.
4. Sater J., Kozioziemski B., Bernat T.P. et al. Cryogenic DT-fuel layers formed in 1 mm spheres by beta-layering. — Fusion Technol., 1999, vol. 35 (2), p. 229.
5. Aleksandrova I.V., Koresheva E.R., Koshelev E.L. Multiple protection methods for cryogenic target delivery to the focus of high repetition rate laser facilities. — VANT. Ser. Termoyadernyi sintez (Problems of Atomic Science and Technology. Ser. Thermonuclear Fusion), 2018, vol. 41, issue 4, p. 73 (in Russian).
6. Aleksandrova I.V., Koresheva E.R., Krokhin O.N., Osipov I.E. Cryogenic hydrogen fuel for controlled inertial confinement fusion (FST formation of cryogenic fuel layer in moving free-standing shells: theory and experiment). — In the same place, 2015, vol.38, issue 3, p. 59 (in Russian).
7. Aleksandrova I.V., Koresheva E.R., Krokhin O.N., Osipov I.E. Cryogenic hydrogen fuel for controlled inertial fusion energy (manufacture of stable superdispersed layer of solid hydrogen isotopes). — In the same place, vol. 38, issue 2, p. 75 (in Russian).
8. Merkuliev Yu.A., Akunets A.A., Borisenko N.G. et al. Laser target technology in Lebedev Physical Institute. — In: Laser Thermonuclear Targets and Superdurable Microballoons. Ed. A.I. Isakov. — New York: Nova Science Publishers, 1996, p. 3.
9. Isakov A.I., Koresheva E.R., Merkul'ev Yu.A., Nikitenko A.I. Interference measurements of the polymer microballoons permeability. — Kratkie soobshcheniya po fizike FIAN (Short messages on physics PhIAS), 1983, № 2, p. 30 (in Russian).
10. Reytlinger S.A. The permeability of polymer materials. — M.: Khimiya (Chemistry), 1974. 36 p. (in Russian).
11. Encyclopedia of polymers. — M.: Sovetskaya entsiklopediya (Soviet encyclopedia), 1972, vol. 1. 612 p. (in Russian).
12. Fries R.J., Farnum E.N. Nondestructive fuel assay of laser targets. X-ray method. — Nuclear Instrum. Methods, 1975, vol. 126, № 2, p. 285.
13. Berrer R. Diffusion in solids. — M.: Izdatel'stvo Inostr.lit. (Pub. house of Foreign lit.), 1948. 65 p. (in Russian)
14. Rot A. Vacuum seals. Reference book. — M.: Energiya (Energy), 1971. 176 p. (in Russian).
15. Mazurin O.V., Strel'tsina M.V., Shvayko-Shvaykovskaya T.P. Properties of glasses and glass-forming melts. Reference book. In 4 vol. — Leningrad: Nauka (Science), 1979. 1076 p. (in Russian).
16. Osipov I.E., Koresheva E.R., Baranov G.D. A ramp filling procedure applied to filling polymer and glass shells with highly pressurized hydrogens. — J. Moscow Phys. Soc., 1999, vol. 9, p. 301.
17. Aleksandrova I.V., Belolipetskiy A.A. Mathematical models for filling polymer shells with a real gas fuel. — Laser and Particle Beams, 1999, vol. 17, № 4, p. 701.

18. **Aleksandrova I.V., Belolipetskiy A.A., Koresheva E.R. et al.** Optimization steps to filling a batch of hiper-scale shells from full-density and porous polymers with a highly-pressurized D<sub>2</sub>/DT fuel (1000 atm): results of modeling and experiments. — VANT. Ser. Termoyadernyi sintez (Problems of Atomic Science and Technology. Ser. Thermonuclear Fusion), 2011, issue 4, p. 22. (in Russian).
19. **Aleksandrova I.V., Belolipetskiy A.A., Kalabuhov V.A. et al.** FST-technologies for high rep-rate proc. of HiPER scale cryogenic targets. — In: Proc. of SPIE, 2011, vol. 8080, p. 80802M.
20. **Farkas A.** Orthohydrogen, steam hydrogen and heavy hydrogen. Transl. from Eng. by Burshtein R.Kh., Levin S.D. — M.: DSTI. Chief editorial board of chem..lit., 1936. 241 p. (in Russian).
21. **Nekrasov B.V.** Fundamentals of general chemistry. Vol. 3 — M.: Khimiya (Chemistry), 1970. 204 p. (in Russian).
22. **Wang S.W., Pitzer K.S.** The ground and excited states of PtH and PtH<sup>+</sup> by relativistic ab initio electronic structure calculation: a model study for hydrogen chemisorptions on Pt surfaces and related photoemission properties. — J. Chem. Phys., 1983, vol. 79 (8), p. 3851.
23. **Nenarokomova V.T., Maslennikov A.I., Ryazantseva N.N. et al.** Specialized massspectrometer for light gases analysis. — VANT. Ser. Radiatsionnaya tekhnika (Problems of Atomic Science and Technology. Ser. Radiation technology), 1986, vol. 1, № 32, p. 39 (in Russian).
24. **Nenarokomova V.T., Ryazantseva N.N., Mileshkin Yu.A.** Specialized massspectrometers for determination of hydrogen and helium isotope composition. — Atomnaya energiya (Atomic energy), 1994, vol. 76, № 2, p. 120 (in Russian).
25. **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.
26. **Horch S., Lorensen H.T., Helveg S. et al.** Enhancement of surface self-diffusion of platinum atoms by adsorbed hydrogen. — Nature, 1999, vol. 398 (6723), p. 134.
27. **Aleksandrova I.V., Koresheva E.R., Koshelev E.L. et al.** Cryogenic hydrogen fuel for controlled inertial confinement fusion (concept of cryogenic target factory based on FST-layering method). — VANT. Ser. Termoyadernyi sintez (Problems of Atomic Science and Technology. Ser. Thermonuclear Fusion), 2016, vol. 39, issue 1, p. 29 (in Russian).
28. **Aleksandrova I.V., Koresheva E.R.** Review on high repetition rate and mass production of the cryogenic targets for laser IFE. — High Power Laser Sci. Engin., 2017, vol. 5, p. e11.
29. **National Research Council.** An Assessment of the Prospects for Inertial Fusion Energy. Report, the National Academies Press. Washington D.C., 2013, 229 p.; [http://fire.pppl.gov/IFE\\_NAS\\_IFE\\_assessment\\_2013.pdf](http://fire.pppl.gov/IFE_NAS_IFE_assessment_2013.pdf).
30. **Aleksandrova I.V., Akunets A.A., Koresheva E.R. et al.** Mechanical mockup of IFE reactor intended for the development of cryogenic targets mass production and rep-rate delivery into the burn area. — Nuclear Fusion, Open Access Peer-Reviewed Chapter, November, 2018; <https://www.intechopen.com/online-first/mechanical-mockup-of-ife-reactor-intended-for-the-development-of-cryogenic-target-mass-production-an>.
31. **Aleksandrova I.V., Koresheva E.R., Koshelev E.L., Nikitenko A.I.** FST transmission line for mass-manufacturing of IFE targets. — In: IAEA 3rd Research Coordination Mtg. of International Atomic Energy Agency on Coordination Research Project «Pathways to Energy from Inertial Fusion: Materials Beyond Ignition». Vienna, Austria, Tashkent, January 21—23, 2019.

#### AUTHORS

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

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

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

**Yaguzinskiy L.S.** A.N. Belozersky Institute of Physico-Chemical Biology of the MSU, Leninskie gory 1, stroenie 40. 119992 Moscow, Russia

Received 6 March 2019

Revised 6 March 2019

Accepted 26 March 2019

Problems of Atomic Science and Technology  
Ser. Thermonuclear Fusion, 2019, vol. 42, issue 2, pp. 66—80