

УДК 621.039.633

## ОПТИМИЗАЦИЯ ПРОЦЕССА ЗАПОЛНЕНИЯ МАССИВА ОБОЛОЧЕК ТИПА HiPER ИЗ КОМПАКТНОГО И ПОРИСТОГО ПОЛИМЕРА ГАЗООБРАЗНЫМ D<sub>2</sub> ИЛИ DT-ТОПЛИВОМ ДО ДАВЛЕНИЯ 1000 атм: МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ И ПОДГОТОВКА ЭКСПЕРИМЕНТА

*И.В. Александрова, А.А. Белоліпецкий, Е.Р. Корешева, Е.Л. Кошелев, И.Е. Осипов, А.И. Сафронов,  
Т.П. Тимашиёва, В.И. Щербаков (ФИАН, Москва, Россия)*

Современные исследования, проводимые в области управляемого термоядерного синтеза, вышли на свою завершающую стадию — создание экспериментального реактора и осуществление генерации электрической энергии. С этой целью в Европе создаётся мощная лазерная установка HiPER (High Power Laser Energy Research), функционирование которой требует формирования и доставки криогенных мишеней ударного поджига с высокой частотой (порядка нескольких Гц). Отметим, что мишени должны быть свободными (т.е. свободными от какого-либо подвеса). В ФИАН разработана технология FST (Free-Standing Targets), в основу которой положен принцип работы с движущимися бесподвесными мишенями, что позволяет формировать криогенные мишени в непрерывном режиме или с необходимой частотой по замкнутому циклу FST-технологий: заполнение—формирование—доставка. В работе обсуждаются результаты по исследованию первого этапа цикла FST, а именно моделирование заполнения массива оболочек класса HiPER газообразным топливом до давления ~1000 атм при 300 К для различных материалов и разной конструкции оболочки. Приведены данные оптимизационных расчётов по диффузионному заполнению одно- и многослойных оболочек в режиме с постоянным градиентом давления для двух видов топлива: дейтерий (D<sub>2</sub>) и дейтерий-тритиевая смесь (DT). Представлены результаты экспериментов и даны практические рекомендации по заполнению оболочек класса HiPER, в том числе оболочек из материала ПАМС (поли-альфа-метил-стирол), с использованием системы заполнения, существующей в ФИАН.

**Ключевые слова:** инерционный термоядерный синтез (УТС), криогенные мишени, заполнение массива оболочек топливом.

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. I.V. ALEKSANDROVA, A.A. BELOLIPETSKIY, E.R. KORESHEVA, E.L. KOSHELEV, I.E. OSIPOV, A.I. SAFRONOV, T.P. TIMASHYEVA, V.I. SHTCHERBAKOV. Current stage in the Inertial Fusion Energy (IFE) research has passed to a closing stage: creation of the experimental reactor and realization of electric power generation. HiPER is a proposed European High Power laser Energy Research facility dedicated to demonstrating the feasibility of laser driven fusion for IFE reactor. The HiPER facility operation requires the formation and delivery of spherical shock ignition cryogenic targets with a rate of several Hz. The targets must be free-standing, or unmounted. At the Lebedev Physical Institute (LPI), significant progress has been made in the technology development based on rapid fuel layering inside moving free-standing targets that refers to as FST layering method. This allows creating continuously or repeatably operating cryogenic target supply system in accordance with a closed FST cycle: fuel filling — fuel layering — target injection. In this report, we have presented the results of our expertise of the first stage of the FST cycle: development of mathematical models for filling a batch of HiPER-scale polymer shells with a fuel gas up to 1000 atm at 300 K for different geometry and materials of the shell. Modeling fill time and rate has shown that filling stage optimization requires using the ramp filling method for both single- and multilayered polymer shells. Both deuterium (D<sub>2</sub>) and deuterium-tritium (DT) mixture as fuel have been considered. Therefore, the work objective is to describe the experimental results and to give a practical guide for developing an efficient pressurization scheme for HiPER-scale shells (including the shells from poly( $\alpha$ -methylstyrene) or PAMS shells) using the fill system existing at LPI.

**Key words:** inertial fusion energy (IFE), cryogenic targets, fuel filling of a shell batch.

### ВВЕДЕНИЕ

Для эффективной работы реактора необходимо, чтобы зона термоядерного горения пополнялась топливом с частотой ~1—10 Гц. Поэтому фабрика топливных мишеней является неотъемлемой частью реактора, задачами которой являются производство необходимого массива бесподвесных мишеней (в среднем порядка 500 000 в день) и их подача в инжектор (систему доставки).

Ключевыми моментами при построении фабрики являются выбор эффективных технологий для формирования криогенных мишеней и построение соответствующего устройства для их производства.

Одним из перспективных направлений является применение FST-технологий [1—12]. В настоящее время именно это направление используется для создания прототипа специализированного модуля формирования для частотного производства сферических криогенных мишеней класса HiPER, поджиг которых осуществляется за счёт кумуляции сходящейся ударной волны ( $E_n \sim 200$  кДж,  $\nu \geq 1$  Гц) [13].

Базовая мишень класса HiPER (Baseline Target-2) представлена в двух модификациях [14]: BT-2 — сферическая полимерная оболочка ( $\varnothing \sim 2$  мм, толщина 3 мкм) с намороженным на её внутренней стороне

топливным слоем (211 мкм); ВТ-2а — аналогичная тонкая оболочка ( $\varnothing \sim 2$  мм, толщина 3 мкм) с прилегающим слоем «полимерная пена + DT» (70 мкм), а далее идёт твёрдый слой из чистого DT (120 мкм).

Первый шаг при создании мишени — это заполнение полимерных оболочек газообразным топливом (изотопы водорода и их смеси) до давления 1000 атм при комнатной температуре. Наиболее распространённым способом заполнения оболочек топливным газом является диффузия. Задача минимизации объёмов трития, а также радиационных дефектов, возникающих в стенке полимерной оболочки вследствие его распада, требует тщательного анализа процесса заполнения одно- и многослойных оболочек. Задача о заполнении многослойных (но не пористых) оболочек водородом и дейтерием, а также DT-смесью до высокого внутреннего давления решена в [15, 16]. В данной работе мы переходим к изучению оболочек, состоящих из двух слоёв, причём внутренний слой представляет собой пористый полимер (ВТ-2а).

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ДИФфуЗИОННОГО ЗАПОЛНЕНИЯ ТОПЛИВОМ ДВУХСЛОЙНОЙ ПОРИСТОЙ ОБОЛОЧКИ КЛАССА HiPER

Первый шаг на пути решения поставленной задачи — это определение прочности двухслойной оболочки ВТ-2а, находящейся под действием избыточного давления топливного газа (внешнего или внутреннего).

**Прочность оболочки ВТ-2а.** Авторами проведено численное решение задачи с использованием пакета прикладных программ КИПР (Code KIPR), разработанного в России [17]. Программы предназначены для определения напряжённо-деформированного состояния в тонкостенных осесимметричных оболочечных конструкциях, составленных из произвольного набора оболочек различного вида.

Условия задачи:

- оболочка мишени ВТ-2а состоит из внешнего компактного полимерного слоя и внутреннего пористого полимерного слоя;
- в пористом слое оболочки ВТ-2а рассматривается вариант только открытых пор;
- рассматриваются поры диаметром от 1 до 10 мкм, отношение толщины стенки пор к диаметру рассматривается равным 0,1;
- внешний (компактный) и внутренний (пористый) слои оболочки ВТ-2а не связаны (не склеены) друг с другом;
- сравнительные данные по геометрии оболочек ВТ-2 и ВТ-2а, взятые из работы [14], даны в табл. 1 и 2.

Т а б л и ц а 1. Основные параметры ВТ-2

Материал	$R_{in}$	$w$	$R_{out}$	$\rho$
DT (пар)	0	833	833	$10^{-4}$
DT (твёрдое)	833	211	1044	0,253
Внешняя оболочка: компактный полимер	1044	3	1047	1,05

Обозначения:  $R_{in}$  и  $R_{out}$  — внутренний и внешний радиус слоя соответственно, мкм;  $w$  — толщина слоя, мкм;  $\rho$  — плотность слоя, г/см<sup>3</sup>.

Т а б л и ц а 2. Основные параметры ВТ-2а

Материал	$R_{in}$	$w$	$R_{out}$	$\rho$
DT (пар)	0	830	830	$10^{-4}$
DT (твёрдое)	830	120	950	0,253
Внутренняя оболочка: пористый полимер, заполненный DT	950	70	1020	0,364
Внешняя оболочка: компактный полимер	1020	3	1023	1,05

В качестве материала внешней стенки рассматривается компактный полистирол (СН). В качестве материала пористого слоя рассматривается пенополистирол типа HiPE (СН HiPE). Свойства данных материалов, необходимые для проведения расчётов, а также полученные при этом результаты представлены в табл. 3.

Т а б л и ц а 3. Результаты расчётов  $\Delta P_{ext}$  и  $\Delta P_{int}$  по коду КИПР для однослойной оболочки ВТ-2 и двухслойной оболочки ВТ-2а

Данные для расчётов [15—20]					Результаты расчётов							
Тип оболочки	Материал	$\rho$ , г/см <sup>3</sup>	$2R_{out}$ , мм	$w$ , км	$\sigma$ , МПа			$E$ , МПа	$\Delta P_{ext}$ , МПа	$\Delta P_{int}$ , МПа		
					300 К	200 К	100 К			300 К	200 К	100 К
ВТ-2	СН	1,05	2,094	3	30	44	68	1000	0,0097	0,172	0,25	0,39
ВТ-2а	СН	1,05	2,046	3	30	44	68	1000	0,0104	0,176	0,258	0,399
	СН HiPE	0,03	2,040	70	0,2	0,4	0,6	12				

Результаты сравнительных расчётов показали, что давление разрушения для однослойной оболочки ВТ-2 (см. 1-ю строку табл. 3) и двухслойной оболочки ВТ-2а (см. 2-ю строку табл. 3) близко по значению, т.е. наличие внутреннего пористого слоя существенно не влияет на значения предельного давления разрушения (как внутреннего  $\Delta P_{\text{int}}$ , так и внешнего  $\Delta P_{\text{ext}}$ ). Значение давления разрушения здесь определяется только внешней тонкой оболочкой из компактного полимера (следствие наличия открытых пор относительно большого размера).

**Постановка задачи о диффузионном заполнении оболочки ВТ-2а газообразным топливом до высокого внутреннего давления.** Классическая криогенная мишень, применяемая в экспериментах управляемого термоядерного синтеза, представляет собой систему вложенных шаровых слоёв, простейший вариант которой — полимерная оболочка и криогенный слой топлива. Полимерная оболочка есть не что иное, как тонкостенная полая сфера, изготовленная из газопроницаемых материалов. Она может иметь защитные покрытия или даже состоять из нескольких слоёв. Чтобы получить криогенный слой значительной толщины, полимерные оболочки предварительно заполняются газообразным топливом из изотопов водорода (включая радиоактивный тритий в составе DT-смеси: 50% молекул DT, 25% трития и 25% дейтерия) до высокого внутреннего давления (~1000 атм).

В силу небольшой прочности реальных полимерных оболочек реализация такого процесса является технологически сложной задачей. При любом режиме заполнения оболочек топливным газом разность между внешним и внутренним давлением на стенке оболочки не должна превышать определённой величины, задаваемой прочностью материала оболочки. Последнее требует знания зависимости от времени внутреннего давления, которое является функционалом от способа или режима подачи внешнего давления. Поскольку газ при высоком давлении не является идеальным (это уже плотный газ с межмолекулярным взаимодействием), а прочностные параметры и коэффициенты газопроницаемости материала стенки оболочки могут быть переменными величинами (например, вследствие накопления радиационных дефектов), то на первое место в исследовании проблемы заполнения полимерных оболочек газообразным топливом выходят методы математического моделирования.

Именно поэтому особо стоит вопрос о заполнении оболочек радиоактивным DT-топливом. В отличие от водорода и дейтерия радиоактивный тритий, входящий в состав газообразного топлива, может влиять на прочностные свойства оболочки, которая со временем становится менее прочной. Другими словами, возможность её заполнения DT-смесью при постоянном градиенте давления будет отлична от традиционного заполнения нерадиоактивными изотопами [15, 16].

Цель данного раздела — провести сравнительные исследования процесса заполнения однослойной оболочки ВТ-2 и двухслойной оболочки типа ВТ-2а реальным газом при наличии радиационных дефектов в материале оболочки.

Для создания математической модели процесса заполнения был предложен подход, основанный на решении краевой задачи Коши для нелинейных параболических уравнений с нелинейными граничными условиями.

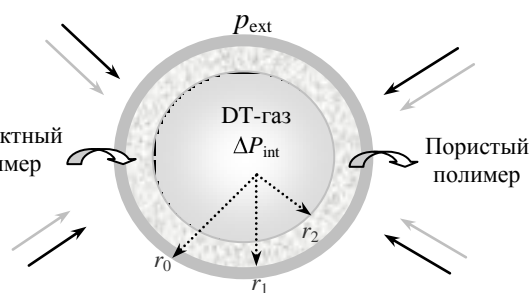


Рис. 1. Пояснения к постановке задачи

В качестве уравнения состояния (как и для случая нерадиоактивных изотопов) использовалось уравнение Ван-дер-Ваальса, устанавливающее связь между давлением  $P$ , температурой  $T$  и плотностью DT-газа  $\rho$ .

Итак, будем изучать общий случай — двухслойную сферическую мишень с внутренним пористым слоем (рис. 1). Пусть газопроницаемость такой мишени описывается с помощью закона Фика, дифференциальная форма которого имеет следующий вид:

$$j_1(r, t) \equiv \rho_1 \mathbf{v} = -K_1 \nabla p_1 \equiv -K_1 \frac{\partial p_1}{\partial r}; \quad (1)$$

$$j_2(r, t) \equiv \rho_2 \mathbf{v} = -K_2 \nabla p_2 \equiv -K_2 \frac{\partial p_2}{\partial r}. \quad (2)$$

Здесь  $j_i(r, t)$ ,  $\rho_i$ ,  $K_i$ ,  $p_i$  — соответственно поток, плотность газа, коэффициент газопроницаемости оболочки и давление газа в точках внешней ( $i = 1$ ) и внутренней ( $i = 2$ ) оболочек. В общем случае коэффициент газопроницаемости зависит от температуры и давления газа, а также от структурных изменений, накопленных за время заполнения DT-смесью.

Уравнение неразрывности

$$\frac{\partial \rho_i}{\partial t} = -\text{div}_{\rho_i} \mathbf{v}$$

для сферически симметричной задачи в каждом слое запишется в виде

$$\frac{\partial \rho_i}{\partial t} = \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} r^2 K_i \frac{\partial p_i}{\partial r}, \quad i = 1, 2. \quad (3)$$

Обозначим давление газа внутри мишени  $p_{\text{int}}(t) \equiv u(t)$ , внешнее давление  $p_{\text{ext}}(t) = p_{\text{int}}(t) + \Delta(t) \equiv u + \Delta$ . Наша задача — выявить вид функции  $p_{\text{int}}(t) \equiv u(t)$ . Для этого изучим граничные условия на поверхностях раздела сред для всех  $t > 0$ .

На внешней границе при  $r = r_0$  справедливо равенство

$$p_1(r_0, t), \quad (4)$$

где  $p_{\text{ext}}(t)$  — внешнее давление, вообще говоря, зависящее от времени.

На границе двух слоёв при  $r = r_1$

$$p_1(r_1, t) = p_2(r_1, t), \quad (5)$$

$j_1(r_1, t) = j_2(r_1, t)$ , или согласно (1) и (2)

$$K_1 \frac{\partial p_1}{\partial r} = K_2 \frac{\partial p_2}{\partial r}. \quad (6)$$

Условия (5), (6) выражают равенство давлений и потоков на границе двух сред.

На внутренней границе при  $r = r_2$

$$p_2(r_2, t) = p_3(r_2, t) \equiv p_{\text{int}}(t). \quad (7)$$

Для записи последнего граничного условия воспользуемся законом сохранения количества вещества. Пусть  $M(t) = 4/3\pi r_2^3 \rho_3(t)$  — масса газа в полости мишени в момент времени  $t$ . Тогда из закона со-

хранения массы следует, что  $\frac{dM}{dt} = -4\pi r_2^2 j_2(r_2, t)$ , или согласно (2)  $\frac{d\rho_3}{dt} = \frac{3K_2}{r_2} \frac{\partial p_2}{\partial r} \Big|_{r=r_2}$ .

Начальные условия

$$p_i(r, 0) = \varphi_i(r), \quad i = 1, 2; \quad p_{\text{int}}(0) = \varphi_2(r_2); \quad \varphi_1(r_0) = \varphi_2(r_2) + \Delta,$$

согласованные с граничными условиями (4)—(6), замыкают задачу (1)—(7).

Ранее было отмечено, что уравнение состояния газа описывается законом Ван-дер-Ваальса.

Уравнение Ван-дер-Ваальса, устанавливающее связь между давлением  $P$ , температурой  $T$  и плотностью газа  $\rho$ , находящегося в термодинамическом равновесии, имеет вид

$$P = \frac{R_g T}{(\mu/\rho) - b} - \frac{a\rho^2}{\mu^2}, \quad (8)$$

где  $R_g$  — индивидуальная газовая постоянная;  $\mu$  — удельный молекулярный вес;  $T$  — абсолютная температура;  $a$  и  $b$  — параметры ( $b = V_{\text{cp}}/3$ ,  $a = 3P_{\text{cp}} V_{\text{cp}}^2$ , где  $V_{\text{cp}}$  и  $P_{\text{cp}}$  — объём и давление в критической точке) (табл. 4).

Т а б л и ц а 4. Критические параметры (плотность, давление и температура) для изотопов водорода и их смесей

Изотопы водорода	H <sub>2</sub>	D <sub>2</sub>	T <sub>2</sub>	DT-смесь
$\rho_{\text{cp}}$ , мг/см <sup>3</sup>	30,1	69,8	108,97	87,06
$P_{\text{cp}}$ , атм	12,98	16,43	18,26	17,5
$T_{\text{cp}}$ , К	33,19	38,34	40,44	39,42

Отметим, что если радиационные дефекты существенны для материала оболочки, то газопроницаемость и, конечно, механическая прочность оболочки, несомненно, являются функцией её структуры —

радиационные дефекты приводят к структурным изменениям в полимерных материалах. В свою очередь, это ведёт к изменению газопроницаемости и прочности оболочки, которые теперь уже необходимо рассматривать как функции от времени заполнения.

Будем предполагать, что коэффициенты газопроницаемости оболочки  $K_i$  являются монотонно возрастающими функциями времени

$$K_i = k_i(1 + \gamma_i t), \quad i = 1, 2.$$

Величина предельно допустимой разности давлений  $\Delta$  также будет переменной во времени величиной вследствие уменьшения прочности оболочки. В простейшем случае функцию  $\Delta(t)$  можно аппроксимировать экспонентой

$$\Delta(t) = \Delta_0 \exp(-\gamma_3 t),$$

которую можно приблизить линейной функцией

$$\Delta(t) = \Delta_0(1 - \gamma_3 t).$$

Напомним, что для минимизации времени заполнения диффузионным методом необходимо поддерживать постоянной максимально допустимую разницу между давлением снаружи и внутри мишени, т.е. наиболее подходящим методом является режим заполнения с постоянным максимально возможным перепадом давления, или, иначе, с постоянным градиентом давления — режим ramp filling ( $\Delta = \text{const}$ ).

В случае наличия радиационных дефектов, т.е. при учёте зависимости прочности и газопроницаемости оболочки от времени, перепад давления на стенке оболочки уже нельзя считать постоянным в течение всего процесса заполнения. Тем не менее поскольку коэффициенты  $\gamma_i$ ,  $i = 1, 2, 3$ , малы, то мы поставили задачу о моделировании процесса заполнения в режиме quasi-ramp filling.

Для режима quasi-ramp filling необходимо получить зависимость от времени для плотности газа в полости мишени. Уравнение состояния (8) позволяет в этом случае вычислить и давление газа внутри мишени.

Численное решение поставленной задачи о заполнении двухслойной оболочки типа ВТ-2а реальным газом при наличии радиационных дефектов в материале оболочки дано далее. Для сравнения приведены результаты, полученные для оболочки ВТ-2 (рис. 2, а, б). Расчёт процесса заполнения выполнен при следующих исходных условиях:

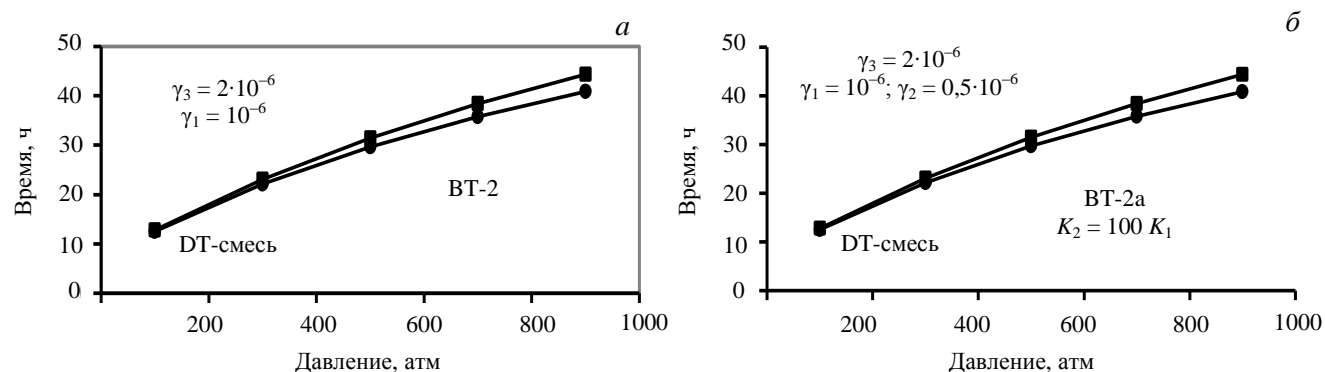


Рис. 2. Влияние радиационных дефектов на ход процесса заполнения для мишеней ВТ-2 и ВТ-2а

— материал внешнего слоя оболочки — полимер, полученный методом плазменного напыления на подложку (везде далее GDP-полимер;  $\rho_{sh} = 1,2—1,04 \text{ г/см}^3$ ), для которого модуль Юнга  $E = 2,6 \text{ ГПа}$ , коэффициент Пуассона  $\nu = 0,3$ ;

— газопроницаемость GDP-полимера (первый слой) по отношению к DT-смеси в случае, если радиационные дефекты не существенны для материала оболочки, равна  $K_1(DT) = 5,8 \cdot 10^{-15} \text{ моль} \cdot \text{м}/(\text{м}^2 \cdot \text{с} \cdot \text{Па})$ ;

— газопроницаемость второго (пористого) слоя по отношению к первому (компактный GDP-полимер) задаётся соотношением  $K_2 = 100 K_1$ ;

— заполнение DT-смесью: ● —  $\gamma_3 = \gamma = \gamma_1 = \gamma_2 = 0$  — радиационные дефекты отсутствуют; ■ — если нет, то  $\gamma_3 = 2 \cdot 10^{-6} > \gamma_1 = 10^{-6} > \gamma_2 = 0,5 \cdot 10^{-6}$ .

На рис. 2 хорошо видно, что, накапливаясь со временем, радиационные дефекты приводят к увеличению времени заполнения. Для случая мишени ВТ-2 указанное изменение составляет ~8%, а для ВТ-2а ~11%. Это, в свою очередь, ведёт к изменению вида «управляющей кривой»  $dP/dt = F(t)$ , где  $F(t)$  есть скорость заполнения, или режим подачи внешнего давления. Отметим, что корректировка работы системы заполнения производится на основании этой кривой таким образом, что разность внешнего и внутреннего давлений не превосходит расчётного давления разрушения оболочки. Поэтому особый интерес представляет детальная разработка практических рекомендаций, необходимых для реализации оптимального процесса диффузионного заполнения топливом полимерных оболочек, при котором исключается разрушение оболочки внешним давлением.

Для решения этой проблемы необходимо рассчитать вид функции  $F(t)$  для каждого типа оболочки. Результаты по скорости заполнения оболочки ВТ-2а с внешним слоем из GDP-полимера и внутренним пористым слоем представлены на рис. 3, 4 для дейтерия и Т-смеси. Газопроницаемость GDP-полимера по отношению к дейтерию и DT-смеси соответственно равна  $K_{D_2} = 6,5 \cdot 10^{-15}$  и  $K_{DT} \sim 5,8 \cdot 10^{-15}$  моль·м/(м<sup>2</sup>·с·Па). Легко видеть, что скорость заполнения мала и лежит в очень узких пределах 0,18—0,64 атм/мин в течение всей процедуры заполнения. Результаты по скорости заполнения оболочки ВТ-2 для разных материалов представлены далее. Для GDP-полимера она также достаточно мала и не превышает 1 атм/мин. Поэтому для снижения рисков при заполнении DT-топливом необходимо провести изучение свойств полимерных материалов (точное определение коэффициентов  $\gamma_i$ ), чтобы учесть при расчёте «управляющей кривой» зависимость прочности и проницаемости оболочки от времени. Это позволит избежать разрушения оболочки и утечки радиоактивного топлива из системы заполнения.

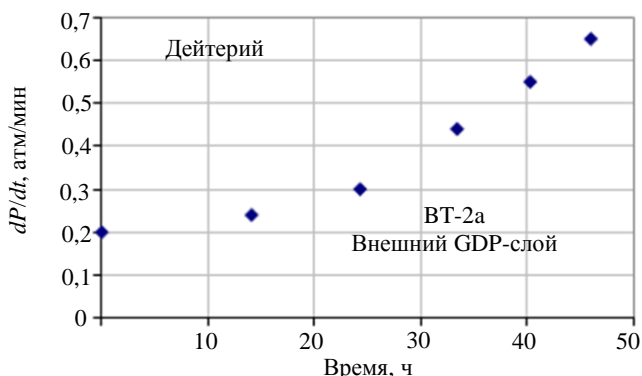


Рис. 3. Скорость заполнения как функция времени (1000 атм, D<sub>2</sub> при 300 К)

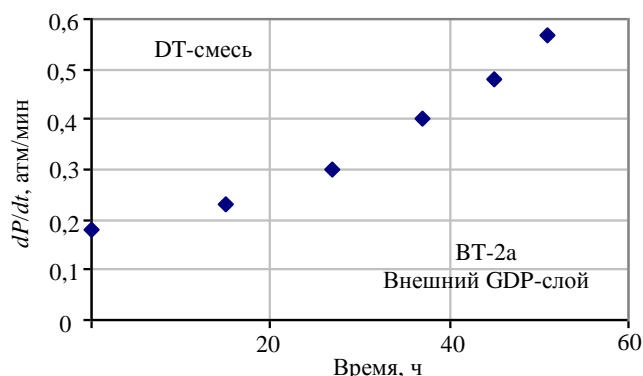


Рис. 4. Скорость заполнения как функция времени (1000 атм, DT при 300 К)

Подведём итог. Если радиационные дефекты существенны для материала оболочки, то в этом случае становится невозможной реализация процедуры заполнения оболочек DT-смесью при постоянном градиенте давления (режим *ramp filling* — процедура традиционного заполнения нерадиоактивными топливными изотопами). Можно говорить лишь о работе системы заполнения в режиме *quasi-ramp filling* при условии малости коэффициентов  $\gamma_i$ ,  $i = 1, 2, 3$ .

Таким образом, при заполнении оболочек радиоактивным топливом в течение длительного времени необходимо иметь достоверную информацию о влиянии излучения на свойства используемых полимеров. Это позволит либо учесть возникающие изменения, либо перейти к рассмотрению других материалов в дизайне мишени.

### СИСТЕМА ЗАПОЛНЕНИЯ ДЛЯ МИШЕНЕЙ КЛАССА HiPER: ПРАКТИЧЕСКАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ ПОЛУЧЕННЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ

Как показали проведённые расчёты, давление заполнения мишеней класса HiPER составляет ~1000 атм при комнатной температуре как для D<sub>2</sub>-топлива, так и для DT. Соответствующие данные представлены в табл. 5, 6, в которых приняты следующие обозначения:  $\rho_f$  — плотность газообразного топлива в мишени при 300 К, мг/см<sup>3</sup>;  $P_f$  — давление заполнения мишени газообразным топливом при

комнатной температуре, атм;  $M_f$  — полная масса топлива, мкг. Другими словами, для подготовки мишеней класса HiPER к эксперименту по формированию криогенного слоя может быть использована система заполнения, существующая в ФИАН, которая позволяет получать в тонкостенных полимерных оболочках внутреннее давление до 1000 атм при 300 К.

Т а б л и ц а 5. Параметры топлива для ВТ-2

Топливо	$\rho_f$	$*P_f$	$M_f$
D <sub>2</sub>	97,0	986,2	462,2
DT	124,5	1036,1	593,3

Т а б л и ц а 6. Параметры топлива для ВТ-2а

Топливо	$\rho_f$	$*P_f$	$M_f$
D <sub>2</sub>	86,8	811,5	371,2
DT	113,0	868,5	488,6

Запуск системы был осуществлён в мае 1999 г. К настоящему времени было проведено более 200 успешных экспериментов по формированию толстого топливного слоя методом FST. В этих экспериментах массив оболочек (до 25 штук) заполнялся газообразным топливом в созданной системе заполнения. Сформированные криогенные мишени имели следующие параметры: оболочки были выполнены из полистирола с диаметром  $\varnothing = 0,7\text{—}1,8$  мм и толщиной стенки от 8 до 15 мкм; толщина слоя варьировалась от 10 до 100 мкм (соответственно давление заполнения варьировалось в диапазоне от 90 до 1000 атм при 300 К); применялись каналы формирования различной геометрии, при этом время пребывания мишени в канале формирования составляло от 4 до 15 с [8].

Подготовка экспериментов включала исследование механической прочности и газопроницаемости полимеров по отношению к изотопам водорода при значительных вариациях температуры. Это позволило практически обеспечить требуемые режимы работы установки, т.е. такие режимы, при которых время заполнения оболочки минимально, возможность её разрушения внешним и внутренним давлением исключена, а обратная утечка газа в процессе хранения или транспортировки оболочек между отдельными модулями установки отсутствует. Именно этот подход будет реализован и при работе с оболочками класса HiPER.

**Особенности построения системы заполнения.** Система заполнения предназначена для диффузионного заполнения массива полимерных или стеклянных оболочек изотопами водорода до давления 1000 атм при комнатной температуре. В основу работы системы заполнения полимерных оболочек положена идея непрерывного (или квази-непрерывного) повышения давления в камере заполнения таким образом, чтобы разность давлений внутри и снаружи оболочки не превышала определённой величины. При этом осуществляются автоматический контроль и управление рабочими характеристиками системы.

Для оболочек, выполненных из одного материала, работа в автоматическом режиме начинается с ввода геометрических и прочностных данных. После этого для каждой оболочки вычисляются давление разрушения и время заполнения до заданного давления. На основании этих данных для исследуемой партии выбирается наименее прочная оболочка. Именно для этой оболочки строится «управляющая кривая»  $dP/dt = F(t)$ . Корректировка работы системы заполнения производится на основании этой кривой таким образом, что разность внешнего и внутреннего давления не превосходит давления разрушения оболочки, которое рассчитывается по формуле (10).

Основная программа позволяет управлять работой установки как в ручном, так и в автоматическом режимах. Кроме того, для удобства работы введены «программные концевые выключатели», когда любые два положения ходового винта могут быть отмечены как крайние точки. Эти положения запоминаются в служебном файле, и после этого все перемещения ходового винта происходят между этими точками. При остановке работы программы происходит сохранение информации о положении ходового винта относительно этих точек, и при следующем запуске программы работа возобновляется из данного положения. Указанные отметки могут быть изменены в процессе работы установки.

Детальное описание системы дано в работе [2]. Перечислим только четыре её главных составляющих:

— система низкого давления (сорбционный компрессор) для подачи и обратимого хранения топлива. Система основана на интерметаллических соединениях (давление 150 атм при 320 °С). Может работать с изотопами водорода, включая и радиоактивные смеси;

— система высокого давления для достижения давления порядка 400 атм. Основной элемент системы — двухступенчатый термокомпрессор, работающий в диапазоне температур 77—300 К;

— пошаговая система подачи газа (мембранный компрессор) с электрическим приводом и промежуточной масляной ступенью, что позволяет заполнить массив мишеней до 1000 атм при 300 К при постоянном градиенте давления;

— камера заполнения с мишенным контейнером (рис. 5), которая может быть адаптирована для работы и с радиоактивным DT-топливом.

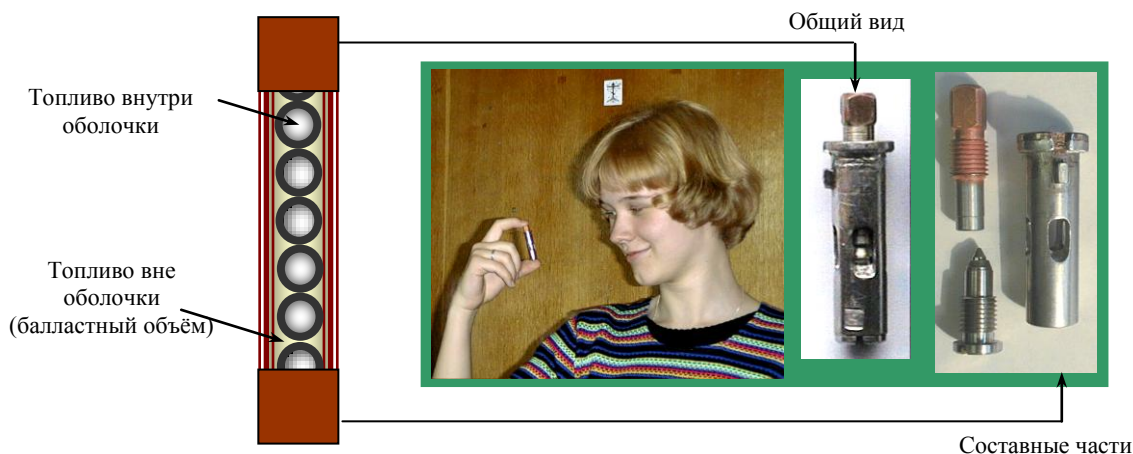


Рис. 5. Мишенный контейнер с заполненными  $D_2$ -топливом оболочками (разработано в ФИАН при построении мишенной системы в рамках проекта МНТЦ № 512)

Крайне важным является и то, что использование незакреплённых мишеней на всех этапах их производства (включая заполнение, см. рис. 5) позволяет существенно сократить запасы трития в системе. Это следует из того, что:

— использование массива незакреплённых мишеней позволяет уменьшить паразитный объём топлива в мишенном контейнере и сократить время заполнения на одну мишень;

— заполнение при постоянном градиенте давления уменьшает время диффузионного заполнения массива как целого;

— не требуется хранение заполненных оболочек, так как после охлаждения контейнера происходит их немедленный сброс в канал формирования.

Результаты заполнения оболочки из полистирола водородом до высоких давлений показаны на рис. 6, 7.

Отметим, что для мишеней типа HiPER рассматриваются три различных материала для внешней оболочки мишени: полиимид, полистирол и GDP-полимер. Поэтому нам необходимо иметь результаты расчёта для трёх различных полимеров по времени и скорости заполнения для первой стадии экспериментов — заполнение однослойных оболочек типа BT-2.



Рис. 6. СН-оболочка ( $\varnothing$  994 мкм) заполнена  $H_2$  до 765 атм при 300 К, затем охлаждена до 14 К. Последующий нагрев производился до 32,3 К

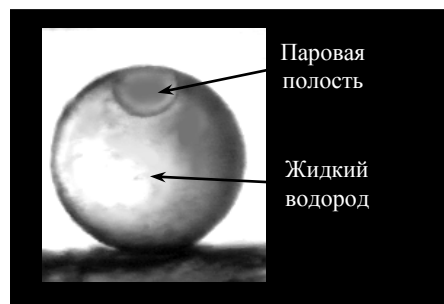


Рис. 7. СН-оболочка ( $\varnothing$  996 мкм) заполнена  $H_2$  до 1000 атм при 300 К, а затем охлаждена до 32 К



Время заполнения (9) однослойной оболочки для газа Ван-дер-Ваальса при постоянном градиенте давления  $\Delta P_{\text{ext}}$  (10) имеет вид [15, 16]

$$t_f = \tau \frac{P_f - P_0}{\Delta P_{\text{ext}}}, \quad \tau = \frac{\tau_0}{1 + \frac{P_f}{\beta}}; \quad (9)$$

$$\Delta P_{\text{ext}} = a_b P_b, \quad P_b = \frac{2E\delta_{\text{sh}}^2}{\sqrt{3(1-\nu^2)}}, \quad \delta_{\text{sh}} = \frac{\Delta R}{R}, \quad (10)$$

где  $P_0$  — начальное давление внутри оболочки;  $P_f$  — конечное давление внутри оболочки;  $t_f$  — время заполнения оболочки от давления  $P_0$  до давления  $P_f$ ;  $P_{\text{ext}}$  — давление внешнего разрушения;  $a_b$  — коэффициент запаса, выбираемый исходя из качества оболочки или условий эксперимента;  $E$  — модуль Юнга;  $\nu$  — коэффициент Пуассона;  $\Delta R$  — толщина оболочки;  $R$  — внешний радиус оболочки. Здесь и далее величина  $a_b = 1,0$ , если не сделано соответствующих оговорок. Величина  $\tau_0$  и величина параметра  $\beta$  определяются следующим образом:

$$\tau_0 = \frac{\delta_{\text{sh}} R_0^2}{3R_g K T_f}; \quad (11)$$

$$\beta = \frac{3R_g T}{V_{\text{cp}}}, \quad (12)$$

где  $R_g$  — газовая постоянная, зависящая от плотности и температуры газа;  $K$  — коэффициент газопроницаемости;  $T_f$  — абсолютная температура в К, при которой осуществляется процесс заполнения;  $V_{\text{cp}}$  — критический объём топлива.

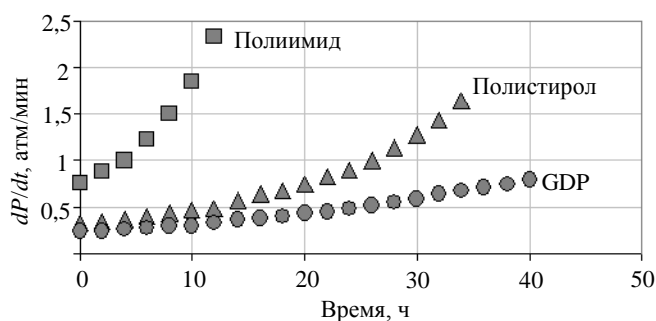


Рис. 8. Управляющая кривая, или скорость заполнения как функция времени для трёх различных материалов оболочки: полиимид, полистирол и GDP-полимер ( $D_2$ , 1000 атм, 300 К)

На рис. 8 представлены сравнительные данные по скорости заполнения дейтерием оболочек ВТ-2 до 1000 атм при 300 К для всех указанных полимеров: полистирола [18, 19, 20] ( $E = 3,83$  ГПа,  $K_{D_2} = 6,0 \cdot 10^{-15}$  моль·м/(м<sup>2</sup>·с·Па)), полиимида [24] ( $E = 3,0$  ГПа,  $K_{D_2} = 1,78 \cdot 10^{-14}$  моль·м/(м<sup>2</sup>·с·Па)) и GDP-полимера [25, 26] ( $E = 2,6$  ГПа,  $K_{D_2} = 6,5 \cdot 10^{-15}$  моль·м/(м<sup>2</sup>·с·Па)). Величина  $dP/dt = F(t)$  — скорость заполнения рассчитана на основании соотношений (9)—(12).

Анализ полученных результатов показывает, что для GDP-полимера складывается достаточно сложная ситуация с точки зрения практической реализации: необходимо обеспечить заполнение со скоростью, лежащей в диапазоне от 0,24 до 0,8 атм/мин, т.е. меньше 1 атм/мин в течение всей процедуры заполнения. Это означает, что требуется осуществить прецизионную подачу давления в мишенный контейнер, чтобы не разрушить находящиеся в нём оболочки. Для полиимида скорость заполнения лежит в диапазоне от 0,8 до 2,4 атм/мин.

Тем не менее существующая в ФИАН установка позволяет реализовать заполнение не только GDP-полимера, но и заполнение более прочных оболочек из полистирола и полиимида за счёт выбора коэффициента  $a_b$ . Покажем это на примере полиимида. Данные по прочностным свойствам этого материала варьируются в широких пределах [25]:  $E = 3,2$ —15 ГПа.

На рис. 9, 10 даны кривые по скорости заполнения  $dP/dt = F(t)$  для различных величин коэффициента  $a_b$ . Хорошо видно, что функция  $F(t)$  как функция времени может быть задана в одном диапазоне изменения для полимеров различной прочности и газопроницаемости.

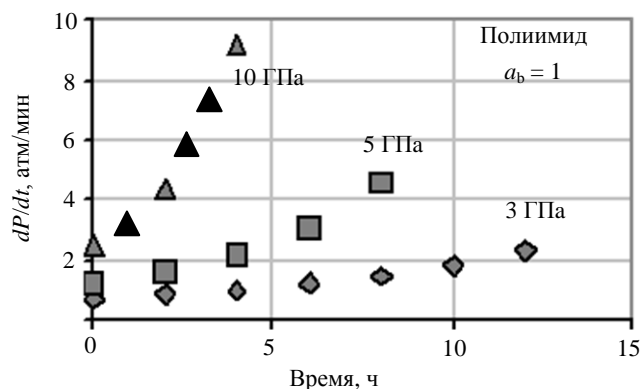


Рис. 9. Скорость заполнения как функция времени при различных значениях прочности оболочки ( $D_2$ , 1000 атм, 300 К)

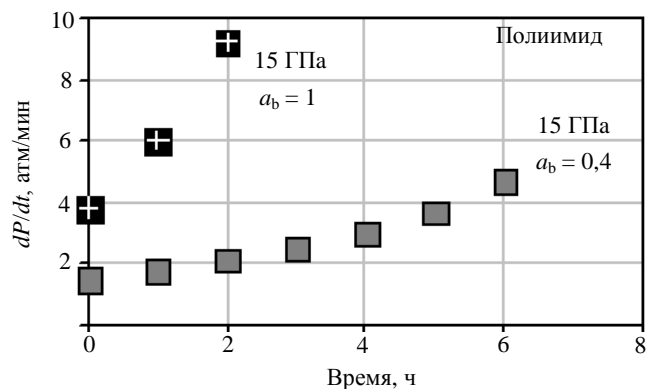


Рис. 10. Скорость заполнения как функция времени при различных значениях коэффициента запаса ( $D_2$ , 1000 атм, 300 К)

В заключение данного раздела отметим, что при работе над проблемой основные усилия были направлены на создание общей физической модели и на разработку математической базы для описания процесса диффузионного заполнения оболочек класса HiPER изотопами водорода и их смесями до высокого внутреннего давления. Обобщая полученные результаты, можно сказать:

— предложена модель заполнения газом многослойной пористой оболочки под действием внешнего высокого давления, когда прочностные параметры и коэффициенты газопроницаемости материала стенки оболочки являются переменными величинами. Получено численное решение задачи для давления внутри оболочки как функционала от режима подачи внешнего давления. Анализ решений позволяет заключить, что существующая в ФИАН система заполнения позволяет реализовать необходимое внутреннее давление топлива ( $P_f \sim 1000$  атм при  $T = 300$  К) как внутри однослойной ВТ-2, так и двухслойной пористой оболочки ВТ-2а;

— расчётные данные по скорости заполнения есть искомые практические рекомендации, которые обеспечивают требуемые режимы работы установки, т.е. такие режимы, при которых время заполнения оболочки минимально, возможность её разрушения внешним и внутренним давлением исключена, а обратная утечка газа в процессе хранения или транспортировки оболочек между отдельными модулями установки отсутствует;

— полученные результаты могут оказаться полезными и для специалистов в области физики и технологии лазерных термоядерных мишеней (имеются в виду производство оболочек с заданными свойствами, изучение процесса заполнения полимерных оболочек при наличии радиационных дефектов и т.д.).

**Заполнение газообразным топливом оболочек класса HiPER.** Проведённые исследования показали, что свойства материала оболочек класса HiPER являются ключевым моментом при минимизации риска разрушения мишени на каждой стадии процедуры FST-формирования—формирование—инжекция. Минимизация риска требует знания следующих свойств материала оболочки: прочность на разрыв, модуль Юнга, внутреннее и внешнее давление разрушения, коэффициент газопроницаемости (для  $D_2$ - и  $DT$ -газа), теплоёмкость, теплопроводность, коэффициент теплового расширения. Практически все эти параметры должны быть известны как для комнатной, так и для криогенной температуры.

На стадии заполнения — это прежде всего данные по прочности и газопроницаемости используемых полимеров. В частности, эти параметры необходимо установить для оболочек из материала ПАМС, поставки которых в ФИАН осуществлены в рамках проекта МНТЦ № 3927 партнёрами проекта (Совет научно-технических ресурсов, Великобритания) [26]. Без проведения соответствующих экспериментов сложно осуществить оптимизацию процедуры заполнения и минимизировать риск разрушения мишеней. Поэтому, используя методы и установки, имеющиеся в ФИАН, была проведена серия тестовых измерений по определению параметров оболочек из материала ПАМС.

В рамках этой задачи выполнено следующее:

— проведена серия измерений внешнего и внутреннего давления разрушения для оболочек из материала ПАМС;

— на основе полученных данных рассчитаны такие характеристики материала ПАМС, как модуль Юнга и предел прочности на растяжение при комнатной и криогенной температуре, определено время заполнения до 1000 атм;

— полученные результаты представлены в табл. 7, 8 и 9.

Т а б л и ц а 7. Измерение внешнего давления разрушения для 10 оболочек из материала ПАМС

№ оболочек	2R, мкм (± 10 мкм) (измерено)	M, мкг (измерено)	ΔR, мкм (измерено)	ΔP <sub>ext</sub> , атм (измерено)		E, ГПа (расчёт)	
				300 К	77 К	300 К	77 К
1	1810	214,2	19,6	23,5	—	4,2	—
2	1816	220,5	20,1	34,2	—	5,8	—
3	1813	217,35	19,8	28,5	—	5,0	—
4	1822	215,1	19,4	—	34,8	—	6,4
5	1805	218,25	20,1	29,8	—	5,0	—
6	1804	223,05	20,6	28,2	—	4,5	—
7	1819	220,95	20,0	26,6	—	4,6	—
8	1810	221,85	20,3	32,1	—	5,3	—
9	1821	210,6	19,0	25,2	—	4,8	—
10	1831	212,85	19,1	—	31,8	—	5,9
					Среднее	4,9	6,15

Обозначения: 2R — средний диаметр; ΔR — средняя толщина стенки; M — вес оболочки; ΔP<sub>ext</sub> — внешнее давление разрушения; E — модуль Юнга.

Диаметры оболочек были измерены с помощью металлографического микроскопа типа ИМЦЛ-100х50А (производство г. Новосибирск, Россия); точность измерения ±0,2 мкм.

Т а б л и ц а 8. Время заполнения D<sub>2</sub>-топливом оболочек № 2, 6 и 8 (выборка из табл. 7)

№ оболочки	E, ГПА	ΔP <sub>ext</sub> , атм	t <sub>т200</sub>	t <sub>т400</sub>	t <sub>т600</sub>	t <sub>т800</sub>	t <sub>т1000</sub>
2	5,8	34,0	0,56	0,98	1,3	1,56	1,76
6	4,5	28,1	0,7	1,2	1,6	1,9	2,20
8	5,3	31,96	0,6	1,05	1,4	1,67	1,89

Примечание: коэффициент запаса a<sub>b</sub> = 1,0; коэффициент газопроницаемости K<sub>D<sub>2</sub></sub> = 6,0 · 10<sup>-15</sup> моль·м/(м<sup>2</sup>·с·Па); t<sub>т200</sub>, t<sub>т400</sub>, t<sub>т600</sub>, t<sub>т800</sub>, t<sub>т1000</sub> — время заполнения в ч до 200, 400, 600, 800 и 1000 атм соответственно.

Т а б л и ц а 9. Измерение внутреннего давления разрушения для пяти оболочек из материала ПАМС

№ оболочки	2R, мкм (± 10 мкм) (измерено)	M, мкг (измерено)	ΔR, мкм (измерено)	ΔP <sub>int</sub> , атм (измерено при 300 К)	Прочность на разрыв σ, МПа (расчёт)
1	1804	223,2	20,4	30	66,3
2	1868	250,2	19,8	>54	>127
3	1732	216,45	21,6	>54	>108
4	1921	252,45	20,5	Дырявая	—
5	1832	216	19,3	30,6	72

Вес оболочек был измерен с помощью аналитических лабораторных весов типа MXA 2/1-SensorDisplay (производство Radwag, Польша); точность измерения ±0,1 мкг.

Давление разрушения было измерено на установке, имеющейся в ФИАН; точность измерения ± 0,1 атм.

Полученные результаты позволяют провести этапы заполнения оболочек топливом и разгерметизации мишенного контейнера с минимальным риском разрушения ПАМС-оболочек внешним ΔP<sub>ext</sub> или внутренним ΔP<sub>int</sub> давлением газообразного топлива.

В частности, используя данные табл. 7, легко рассчитать оптимальную «управляющую кривую» диффузионного заполнения оболочек dP/dt = F(t) так, чтобы разность внешнего и внутреннего давлений не превосходила расчётного давления разрушения оболочки. Кроме того, данные табл. 7 были использованы для расчёта времени заполнения оболочек из материала ПАМС D<sub>2</sub>-топливом до 1000 атм при 300 К (см. табл. 8).

Полученные результаты позволяют сделать следующие выводы:

— хорошо видно, что расчётные значения величины ΔP<sub>ext</sub> находятся в хорошем согласии с экспериментом;

— малое время заполнения обусловлено тем, что оболочки из материала ПАМС имеют значительную толщину ~20 мкм (см. формулы (9)–(12) и табл. 7);

— результаты серии тестовых измерений и полученные расчётные данные показывают, что за счёт выбора коэффициента  $a_b$  (см. формулу (10)) можно обеспечить наиболее оптимальные режимы работы системы заполнения (рис. 11).

После процедуры заполнения мишенный контейнер с оболочками переносится от системы заполнения (см. рис. 5) к модулю формирования (рис. 12).

Перед началом экспериментов по FST-формированию топливного слоя контейнер с заполненными оболочками охлаждается до температуры  $T_d$  (температура разгерметизации), существенно более низкой, чем комнатная температура. Это необходимо для осуществления его разгерметизации, т.е. удаления из мишенного контейнера топлива, находящегося вне оболочек (см. рис. 5).

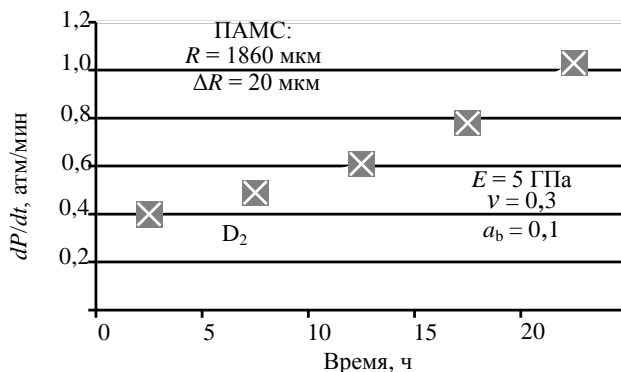


Рис. 11. Скорость заполнения как функция времени (1000 атм,  $D_2$ )

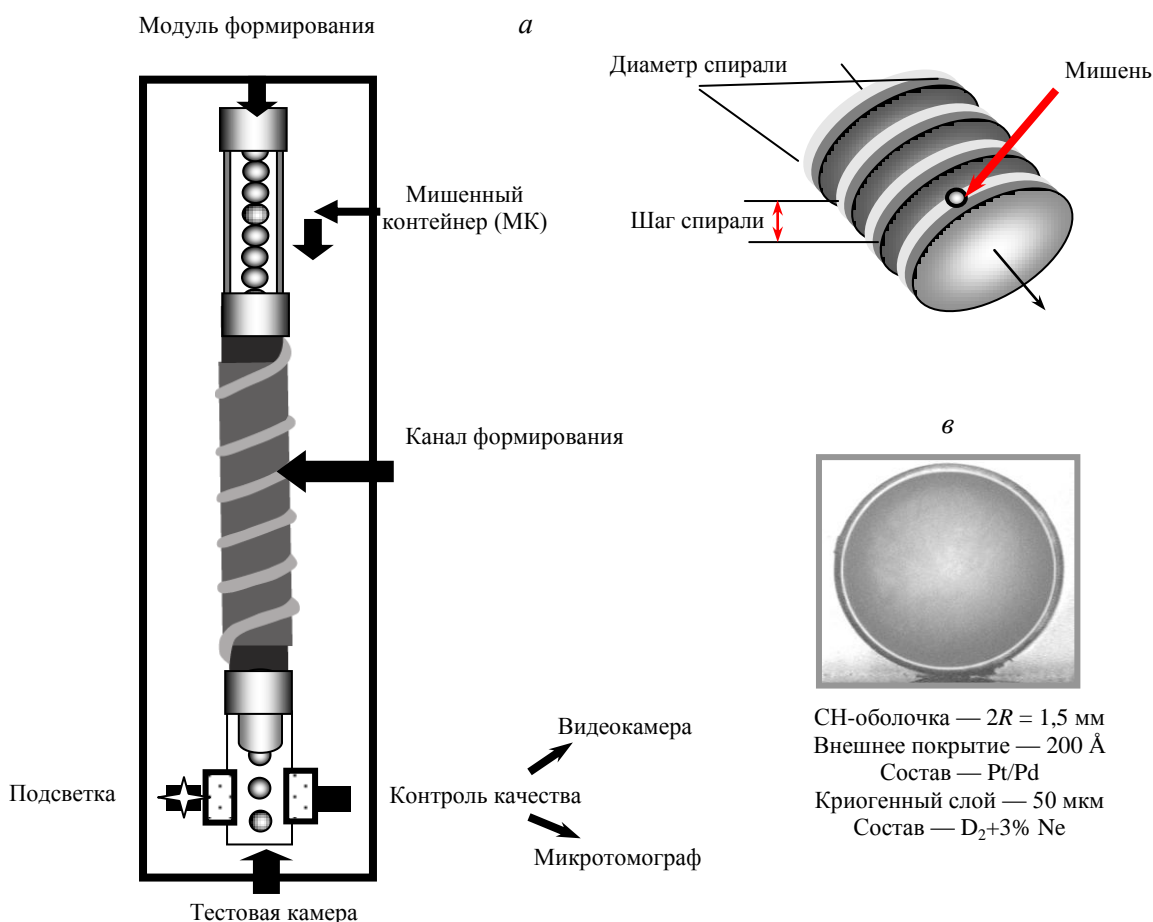


Рис. 12. Непрерывное формирование бесподвесных мишеней методом FST: а — схема модуля формирования; б — движение мишени по спиральному каналу формирования; в — сформированная в канале мишень

Возможность осуществить процедуру разгерметизации мишенного контейнера в условиях, исключающих как разрушение оболочки внутренним давлением, так и утечку из неё топлива вследствие обратной диффузии, появляется лишь при условии понижения температуры, когда давление газа в оболочке падает, газопроницаемость её стенки снижается, а прочность материала оболочки растёт.

Так как давление газа в оболочке не зависит от материала её стенки, то возможность осуществления того или иного варианта для рассматриваемого дизайна мишеней определяется лишь прочностью используемой полимерной оболочки и величиной её аспектного отношения. Это ещё раз подчёркивает важность надёжной исходной базы данных (как при комнатной, так и при криогенной температуре) по свойствам предлагаемых полимеров для производства криогенных мишеней класса HiPER.

В табл. 9 показаны данные экспериментального определения величины внутреннего давления разрушения  $\Delta P_{\text{int}}$  оболочек из материала ПАМС при  $T = 300$  К, а также расчётные значения прочности на разрыв для данного материала. Поскольку значение прочности полимерных материалов с понижением температуры, как правило, увеличивается [18, 19], то полученное значение прочности можно использовать для оценок величины  $T_d$ .

Согласно данным табл. 9 для оболочек из материала ПАМС внутреннее давление разрушения  $\Delta P_{\text{int}}$  составляет величину больше 30 атм. Это существенно выше величины критического давления как для дейтерия (16,43 атм), так и для ДТ-смеси (17,5 атм) (см. табл. 1). Поэтому разгерметизация МК может быть осуществлена при  $T_d > T_{\text{cp}}$  ( $T_{\text{cp}}$  — величина критической температуры), т.е. когда удаляется топливный газ.

Подчеркнём, что этап разгерметизации является одним из наиболее важных и сложных этапов в цепочке транспортировки бесподвесных мишеней, поскольку:

— и экономически, и технологически наиболее удобной является разгерметизация МК, когда топливо находится в газообразном состоянии (удаляется топливный газ, а не жидкое топливо, находящееся вне оболочек);

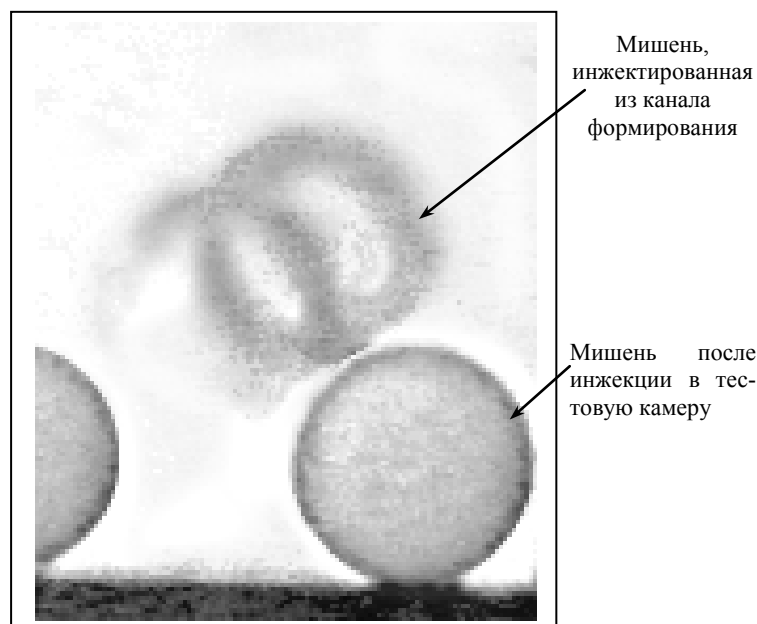


Рис. 13. Инжекция мишеней из канала формирования в оптическую тестовую камеру при  $T = 4,2$  К

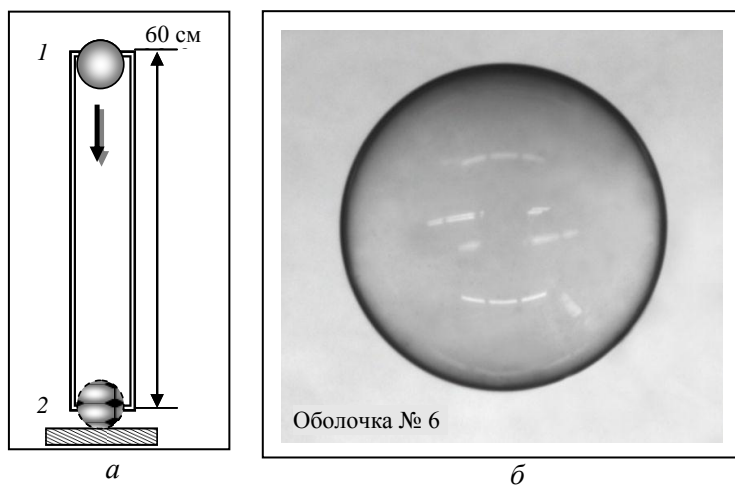


Рис. 14. Проброс оболочек из материала ПАМС в вертикальном канале: а — схема эксперимента; б — оболочка после её приземления (положение 2 на рисунке а). Параметры оболочки:  $\varnothing 1862$  мм, толщина стенки 19,8 мкм, вес 231,3 мкг

— с точки зрения формирования криогенного слоя в случае разгерметизации в газообразной фазе реализуется более широкий диапазон для выбора оптимальной температуры входа мишени в канал формирования.

Поэтому очень важным является определение верхнего значения температуры разгерметизации. В нашем случае оно составит  $T_d \gg T_{\text{cp}} > 40$  К (см. табл. 1, 9).

Переходим к вопросу, связанному с устойчивостью мишени при ударе применительно к процессу инжекции мишеней в оптическую тестовую камеру (см. рис. 12, 13).

Для этого нами проведена следующая серия экспериментов: осуществлён проброс пяти оболочек (выборка из табл. 7) из материала ПАМС в вертикальном трубчатом канале, высота которого составляла 60 см (рис. 14, а). Такие условия заведомо более жёсткие, поскольку проектируемая высота спирального канала формирования (см. рис. 12) составляет 50 см. Результат исследования состоит в следующем: ни одна оболочка не разрушилась при падении в канале с высоты 60 см. На рис. 14, б показана теневая фотография оболочки № 6 после её падения в вертикальном канале.

Таким образом, наши эксперименты доказали устойчивость исследуемых оболочек при действии осевого давления, возникающего при их инжекции в тестовую камеру. Кроме того, мы приходим к выводу, что:

— внешняя полимерная оболочка может служить защитой для внутреннего хрупкого слоя топлива, и мишень с оболочкой из материала ПАМС должна иметь высокую устойчивость при скоростном ударе;

— данный тип оболочек с параметрами, указанными в табл. 7, можно использовать в экспериментах по FST-формированию.

**Адаптация системы заполнения для работы с DT-топливом.** Проблемы безопасности при работе с радиоактивным DT-топливом требуют минимизации количества трития, применяемого в технологическом цикле, т.е. минимизации временных и пространственных масштабов каждого этапа производства. На сегодняшний день проблема стоит тем более остро, что перспективные разработки в области управляемого термоядерного синтеза сориентированы на создание лабораторной энергетической установки, требующей массового производства криогенных мишеней и их частотной доставки в область термоядерного горения.

Мишенная система (и входящая в её состав система заполнения) пригодна для работы с DT, если в её конструкции решены следующие задачи:

- минимизировано содержание трития в системе;
- материалы, из которых сделаны элементы, пригодны для работы с DT;
- приняты необходимые меры безопасности при работе с радиоактивным тритием.

Отметим, что при создании системы заполнения на территории ФИАН учитывались все перечисленные факторы. Мы уже отмечали, что поскольку система работает с массивом бесподвесных мишеней, это минимизирует паразитный объём газа в камере заполнения и мишенном контейнере, а также время заполнения в расчёте на одну мишень.

Выбор материалов и покрытий для изготовления многих элементов системы заполнения осуществлялся с точки зрения пригодности для работы с DT, при этом внутренние объёмы элементов установки заполнения были по возможности минимизированы (в рамках обеспечения надёжности работы системы), установка заполнения сконструирована в соответствии с теоретическими расчётами оптимальной процедуры заполнения.

Содержание трития в свободном состоянии можно существенно снизить, если в установке заполнения в качестве источника DT-топлива использовать интерметаллический накопитель. Сорбционный компрессор [28, 29] на базе интерметаллического накопителя (система низкого давления) пригоден для работы с любыми изотопами водорода, в том числе радиоактивными. Его работа основана на способности интерметаллических соединений (ИМС) сорбировать изотопы водорода при низких и десорбировать при высоких температурах. В настоящее время устройство успешно эксплуатируется в составе созданной в ФИАН установки заполнения.

Особенностью сорбционного компрессора является высокая безопасность эксплуатации. При аварийной разгерметизации этого компрессора не происходит выброса в атмосферу большой массы газа (как при аварии механического компрессора), а лишь медленное разложение гидридов ИМС с выделением изотопов водорода, причём в силу эндотермичности реакции с течением времени скорость разложения уменьшается.

Сорбционный компрессор прост в эксплуатации. На рис. 15 показана экспериментальная зависимость  $P = f(T)$ , найденная для интерметаллида ZrCrFe. Это вещество позволяет достигать давления изотопов водорода до 200 атм при температуре гидрида 350—400 °C. Воспроизводимость результатов подтверждена более чем в 3000 циклов, что является характеристикой надёжности работы устройства.

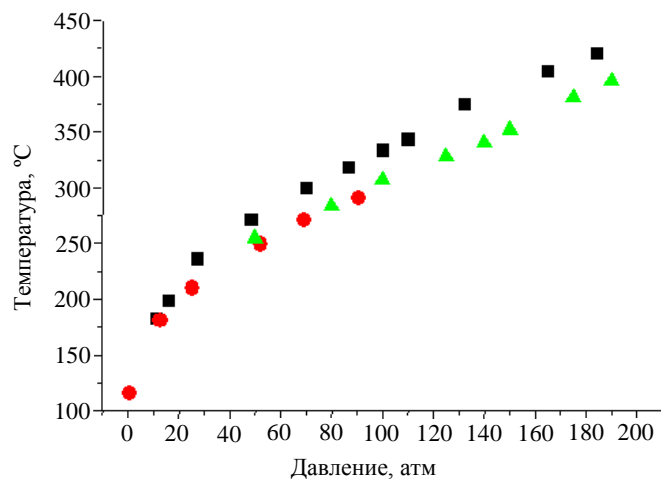


Рис. 15. Температурная зависимость давления термодиссоциации в области плато [28]: ■ — H<sub>2</sub>; ● — D<sub>2</sub>; ▲ — H<sub>2</sub>-D<sub>2</sub>

Важным условием применения системы для работы с радиоактивным ДТ-топливом является выбор подходящего материала для изготовления элементов конструкции. Требования к элементам конструкции и оборудования устройства формирования определяются условиями эксплуатации (размещение МК с мишенями, содержащими 1000 атм газообразного ДТ-топлива при 300 К, охлаждение оболочек в МК до температуры ~25 К, вариации температуры в канале формирования от 25 до 4,2 К), а также специфическими свойствами трития, обладающего высокой проникающей способностью. Это накладывает особые требования к выбору материалов при проектировании и обеспечению условий безопасности эксплуатации.

Разрушение элементов может быть вызвано коррозией, охрупчиванием или химическим взаимодействием конструкционных или уплотнительных материалов с тритием. Процессы проникаемости трития в материалы и его изотопный обмен являются важными характеристиками при выборе материалов и контроле уровня загрязнения.

Образование окислов трития, аммония, углеводородов и других органических соединений может представлять дополнительную радиологическую опасность. Средняя энергия  $\beta$ -частицы трития (5,7 кэВ) более чем в 1000 раз превосходит энергию разрушения химических связей. Таким образом, многие химические взаимодействия являются радиологически катализированными.

Тритий реагирует с галогеносодержащими материалами, такими, как фторопласт, образуя высококоррозионные кислоты.

В металлах водород растворяется в атомарном состоянии. Поскольку некоторые металлы являются эндотермическими поглотителями водорода, а другие — экзотермическими, растворимость его при комнатной температуре может изменяться на 10—15 порядков (рис. 16).

Важными характеристиками металлических и неметаллических материалов, предназначенных для работы в водородной среде, являются проникаемость, коэффициент диффузии и сорбционная способность.

Проникаемость водорода по отношению к различным материалам в порядке её повышения может быть представлена следующим рядом: керамика и графит, силикатные окислы, негидридообразующие металлы, гидридообразующие металлы и полимеры (рис. 17).

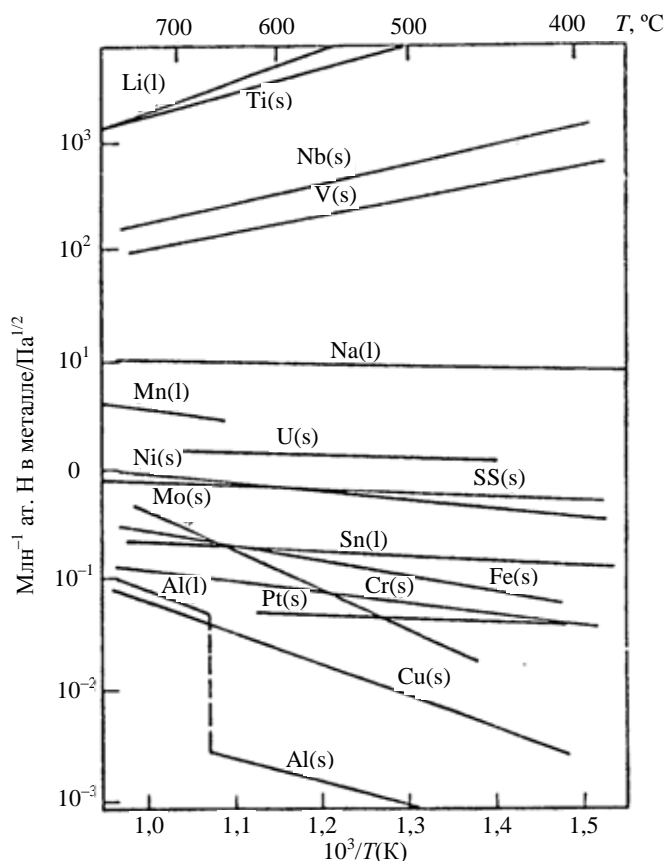


Рис. 16. Растворимость водорода в металлах и сплавах в зависимости от температуры [30]

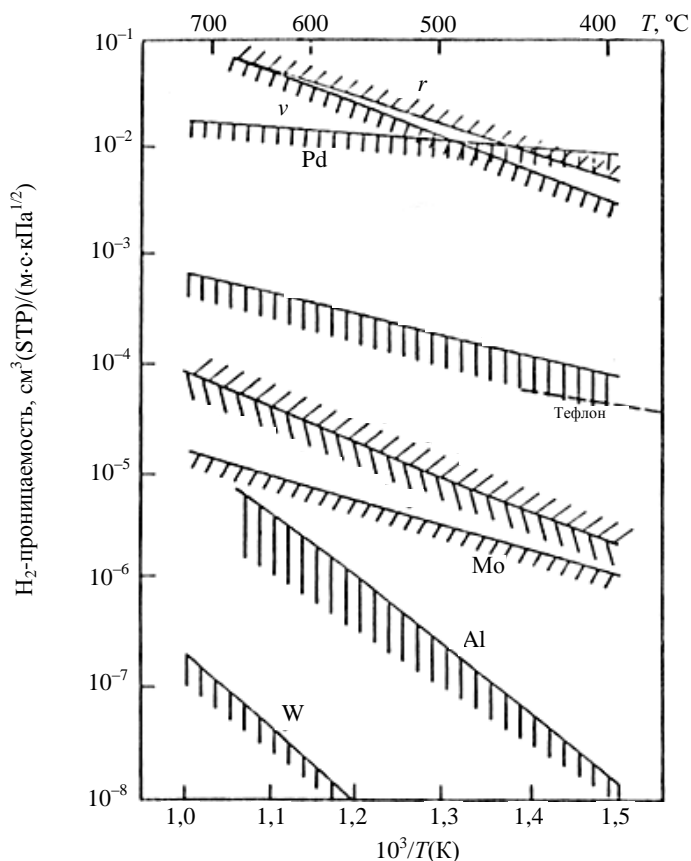


Рис. 17. Водородная проникаемость металлов и сплавов в зависимости от температуры [30]; STP — стандартное давление

Водородная или  $H_2$ -проницаемость окислов металлов при заданной температуре на порядки величин ниже, чем проницаемость металлов. Тонкие поверхностные окислы снижают проницаемость водорода. Однако воздействие  $\beta$ -излучения трития на окисные слои может привести к образованию в них дефектов и заметному повышению общей проницаемости покрытых металлов [30].

При выборе материалов для прототипа модуля формирования (МФ) следует всесторонне оценить соответствие кандидатных металлов и сталей условиям эксплуатации.

В качестве конструкционных материалов для узлов МФ следует применять нержавеющие аустенитные стали с низким содержанием углерода по ГОСТ 5632-72: 03X18H12 (типа 304L), 03X18H10T или 03X17H14M3 (типа 316L). Эти стали обладают низкой водородной проницаемостью при температуре ниже 100—300 °С, устойчивы при криогенной температуре и высоком давлении.

Перечисленные стали являются основными конструкционными материалами для многих областей техники (в том числе криогенной), так как обладают хорошей технологичностью при холодной пластической деформации, хорошо свариваются, обладают высоким сопротивлением к ударным нагрузкам при температурах вплоть до температуры кипения жидкого гелия.

Большим преимуществом этих сталей является способность сохранять ударную вязкость после многолетней эксплуатации при криогенной температуре. В качестве прокладочных материалов в разъёмных соединениях тритиевого контура следует применять такие металлы, как Cu, Ni, Al.

Таким образом, результаты, представленные в данной работе, показали, что появляется возможность проведения исследований с бесподвесными мишенями, заполненными DT, на проектируемых и действующих мощных лазерных установках, таких, как ИСКРА-6 (Россия), HiPER (Евросоюз), NIF (США) и других.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Характерная особенность текущего этапа в развитии лазерного термоядерного синтеза — это разработка научной и технологической базы для высокочастотной подачи топлива в фокус мощной лазерной установки или реактора (в зарубежной терминологии — эра High Rep-Rate).

В ФИАН проведён цикл теоретических и экспериментальных исследований, которые показали, что перспективным путём решения проблемы частотного формирования и доставки криогенных мишеней без разрушения является реализация FST-технологий, работающих по замкнутому циклу заполнение—формирование—доставка (инжекция). Создано лабораторное оборудование, которое моделирует весь процесс приготовления незакреплённой криогенной мишени — от её заполнения топливом до осуществления доставки в лазерный фокус. Показано теоретически и экспериментально, что развитая технология пригодна для широкого класса криогенных мишеней, в том числе для мишеней реакторного масштаба. Особо подчёркивается, что структура топлива должна быть устойчивой к воздействию механических и тепловых нагрузок, возникающих в процессе доставки мишеней в камеру термоядерного реактора.

В настоящей статье представлены результаты экспертного анализа по исследованию первого этапа цикла FST для оболочек диаметром более 2 мм, а именно моделирование заполнения массива оболочек класса HiPER газообразным топливом до давления ~1000 атм при 300 К для оболочек из различных полимерных материалов и различной конструкции (BT-2 и BT-2a). Приведены данные по оптимизации работы системы заполнения для двух видов топлива — дейтерий (в режиме ramp filling — с постоянным градиентом давления) и дейтерий-тритиевая смесь (в режиме quasi-ramp filling).

Показано, что существующая в ФИАН система заполнения позволяет реализовать необходимое давление (~1000 атм при комнатной температуре) внутри высокоаспектных оболочек класса HiPER. Представлены результаты экспериментов и даны практические рекомендации по диффузионному заполнению оболочек из материала ПАМС (поли-альфа-метил-стирол).

Работа выполнена в рамках проекта МНТЦ № 3927 и при финансовой поддержке Совета научно-технических ресурсов (Великобритания).



Авторы благодарны доктору Крису Спендлоу за безвозмездное предоставление микросфер из материала ПАМС, профессору Ю.А. Меркульеву за консультации по свойствам полимерных материалов и ценные советы.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Aleksandrova I.V. et al.** Free-standing target technologies for ICF. — *Fusion Technology*, 2000, vol. 38, № 1, p. 166—172.
2. **Osipov I.E. et al.** A Ramp filling procedure applied to filling polymer and glass shells with highly pressurized hydrogens. — *J. Moscow Phys. Soc.*, 1999, vol. 9, p. 301—309.
3. **Aleksandrova I.V. et al.** Rapid fuel layering inside moving free-standing targets: modeling results. — *Laser and Particle Beams*, 2000, vol. 20 (01), p. 13—21.
4. **Aleksandrova I.V. et al.** Rep-rate cryogenic solid layering using free-standing target system. — In: 2nd Intern. Conf. on Inertial Fusion Science and Applications (IFSA). Kyoto, Japan, September 9—14, 2001.
5. **Aleksandrova I.V. et al.** Extension of free-standing technologies on IFE requirements. — *Inertial Fusion Science and Application, State of the art 2001 (ELSEVIER)*, 2002, p. 762—766.
6. **Koresheva E.R. et al.** Progress in the extension of free-standing target technologies on IFE requirements. — *Fusion Sci. Technol.*, 2003, vol. 35, № 3, p. 290—300.
7. **Корешева Е.Р. и др.** Защитная капсула для доставки криогенной топливной мишени в лазерный фокус. — ВАНТ. Сер. Термоядерный синтез, 2004, вып. 2, с. 11—24.
8. **Aleksandrova I.V. et al.** An efficient method of fuel ice formation in moving free standing ICF/IFE targets. — *J. Phys. D: Appl. Phys.*, 2004, vol. 37, p. 1163—1179.
9. **Koresheva E.R. et al.** Free-standing target technologies for inertial confinement fusion: fabrication, characterization, delivery. — *Laser and Particle Beams*, 2005, vol. 23, p. 563—571.
10. **Александрова И.В. и др.** К решению проблемы сохранения параметров криогенной мишени в процессе ее доставки в зону термоядерного горения. — ВАНТ. Сер. Термоядерный синтез, 2007, вып. 3, с. 27—47.
11. **Александрова И.В., Белоліпецкий А.А., Корешева Е.Р.** Состояние проблемы криогенных топливных мишеней в современной программе инерциального термоядерного синтеза. — *Вестник РАН*, 2007, вып. 7, № 2, с. 37—42.
12. **Aleksandrova I.V. et al.** Thermal and mechanical responses of cryogenic targets with a different fuel layer anisotropy during delivery process. — *J. Russian Laser Research*, 2008, vol. 29(5), p. 419—431; <http://springerlink.metapress.com/content/1573—8760>.
13. <http://en.wikipedia.org/wiki/HiPER>.
14. **Tolley M.K., Perrin J.-P., Perlado J.M.** Microtarget requirements, production and delivery for HiPER. — In: 22nd IAEA Fusion Energy Conf. Geneva, 12—18 October 2008. Report IF/P7-2.
15. **Aleksandrova I.V., Belolipetskiy A.A.** An efficient method for filling targets with a highly-pressurized gas fuel. Mathematical model for single- and multilayered target. — *J. Moscow Phys. Soc.*, 1999, vol. 9, p. 325—335.
16. **Aleksandrova I.V., Belolipetskiy A.A.** Mathematical models for filling polymer shells with a real gas fuel. — *Laser Particle Beams*, 1999, vol. 17(4), p. 701—712.
17. **Мяченков В.И., Чеканин А.В., Ольшанская Г.Н.** Автоматизация конструирования и прочностных расчётов тонкостенных осесимметричных конструкций (КИПР-ИВМ 3.0). — М.: МГТУ «Станкин», 2001.
18. **Энциклопедия полимеров.** — М.: Советская энциклопедия, 1972.
19. **Кожевников И.Г., Новицкий Л.А.** Теплофизические свойства материалов при низких температурах. Справочник. 2-е изд. — М.: Машиностроение, 1982. 328 с.
20. **Малков М.П. и др.** Справочник по физико-техническим основам криогеники. — М.: Энергия, 1973. 392 с.
21. **Дементьев А.Г., Тараканов О.Г.** Влияние ячеистой структуры пены на механические свойства пенопластов. — *Механика полимеров*, 1972, т. 4, с. 594—602.
22. <http://maxmir.com/synthetic>.
23. **Benson J.R.** Highly porous polymers. — *American Laboratory*, April 2003.
24. **Tsai F.-Y., Kuo Y.-H., Harding D.R.** Properties and structure of vapor-deposited polyimide upon electron-beam irradiation. — *J. Appl. Phys.*, 2006, vol. 99, p. 064910.
25. **Alfonso E.L. et al.** Properties of polyimide shells made using vapor phase deposition. — *J. Materials Research*, 1998, vol. 13 (10), p. 2988—3000.
26. **Международный научно-технический центр, проект № 3927.** Разработка специализированного модуля высокочастотного формирования криогенных мишеней. 2009—2011 гг.; <http://www.istc.ru>.
27. **Nikroo A. et al.** Production of higher strength thin walled glow discharge polymer shells for cryogenic experiments at OMEGA. — *Inertial Fusion Science and Applications 2001*. Eds. K.A. Tanaka, D.D. Meyerhofer, J. Meyer-ter-Vehn. ELSEVIER, 2002, p. 794—797.
28. **Rivkis L.A., Osipov I.E., Kniazev A.I.** A conceptual design of the facility for application to reversibly store hydrogens. Report. — In: *Microspheres-Microcapsules and Laser Target Technology Specialist Workshop*, Moscow, 1997.
29. **Perevesentsev A.N. et al.** Hydrides of intermetallic bonds and alloys, their properties and application in nuclear technology. — *Physics of the Elementary Particles and Atomic Nucleus*, 1988, vol. 19(6), p. 1386—1439.
30. **Handling of tritium-bearing wastes.** — In: *International Atomic Energy Agency. Techn. Rept.* — Vienna: IAEA, 1981, № 203, p. 137.

**Физический институт им. П.Н. Лебедева Российской академии наук (ФИАН), 119991 ГСП, Москва,  
Ленинский просп., 53, Россия**



Ирина Владимировна Александрова, с.н.с., к.ф.-м.н., ветеран атомной энергетики и промышленности  
ivaaleks@gmail.com



Александр Алексеевич Белолипецкий, начальник отдела, д.ф.-м.н., профессор, академик РАЕН  
ivaaleks@gmail.com



Коршева Елена Ростиславовна, г.н.с., д.ф.-м.н., ветеран атомной энергетики и промышленности  
koresh@sci.lebedev.ru



Евгений Леонидович Кошелев, н.с.  
2814rosti@mail.ru



Игорь Евгеньевич Осипов, с.н.с., к.ф.-м.н., ветеран атомной энергетики и промышленности  
igosipov@mail.ru



Александр Иванович Сафронов, с.н.с., к.техн.н., ветеран атомной энергетики и промышленности, награждён медалью «50 лет атомной энергетики СССР»  
safronov@100km.ru



Татьяна Петровна Тимашёва, с.н.с., к.ф.-м.н., ветеран атомной энергетики и промышленности  
timashtp@gmail.com



Владимир Игоревич Щербаков, аспирант  
vischerbakov@yandex.ru

Статья поступила в редакцию 10 августа 2011 г.  
Вопросы атомной науки и техники.  
Сер. Термоядерный синтез, 2011, вып. 4, с. 22—39.