

УДК 621.039.633

## КРИОГЕННЫЕ МИШЕНИ УДАРНОГО ПОДЖИГА: МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕДУРЫ ЗАПОЛНЕНИЯ ВОДОРОДНЫМ ТОПЛИВОМ МЕТОДОМ ДИФФУЗИИ

*И.В. Александрова, Е.Р. Корешева*

*Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Физический институт им. П.Н. Лебедева Российской академии наук, Москва, Россия*

В настоящее время в рамках Международного агентства по атомной энергии (МАГАТЭ) стартовал координационный научный проект «Энергия инерционного синтеза: исследования материалов и развитие технологий» (Pathways to Energy from Inertial Fusion: Materials Research and Technology Development) [1]. Физический институт им. П.Н. Лебедева (ФИАН) принимает участие в данном проекте согласно контракту № 24 154. Цель исследований — разработка технологий массового производства криогенных топливных мишеней ударного поджига с низким начальным аспектным отношением. Предполагается, что такие мишени являются более гидродинамически устойчивыми в процессе имплозии [2, 3]. Ключевой аспект — создание методов и технологий, функционирующих в частотном режиме [1]. Для решения поставленных задач предложено использовать разработанный в ФИАН уникальный метод FST (free-standing target) [4, 5], оперирующий с бесподвесными, поточно движущимися мишенями. Это позволяет экономично производить требуемое количество мишеней и с заданной частотой инжектировать их в фокус мощной лазерной установки или реактора ИТС. Подготовительный этап перед началом формирования любых криогенных мишеней — это заполнение их топливом, представляющим собой дейтерий ( $D_2$ ) или дейтерий-тритиевую смесь ( $D-T$ ). В мировой практике принято осуществлять этап заполнения либо методом диффузии газообразного топлива через стенку оболочки мишени, либо инжектировать жидкое топливо через тонкий капилляр (в несколько десятков микрометров), встроенный в стенку оболочки. В данной работе впервые представлены результаты моделирования процесса диффузионного заполнения мишеней ударного поджига с низким начальным аспектным отношением до давления 1250 атм. при 300 К для различных материалов оболочки мишени. Обсуждаются вопросы реализации оптимального варианта процедуры заполнения, в основе которой лежит режим с постоянным градиентом давления, позволяющий избежать механического разрушения мишеней в течение всего цикла заполнения.

**Ключевые слова:** инерциальный термоядерный синтез (ИТС), криогенные мишени ударного поджига, диффузионное заполнение топливом.

## CRYOGENIC TARGETS FOR SHOCK IGNITION: MODELING OF DIFFUSION FILLING WITH A HYDROGEN FUEL

*I.V. Aleksandrova, E.R. Koresheva*

*P.N. Lebedev Physical Institute of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia*

Currently, within the framework of the International Atomic Energy Agency (IAEA), a coordination research project (CRP) «Pathways to Energy from Inertial Fusion: Materials Research and Technology Development» has been started [1]. The P.N. Lebedev Physical Institute (LPI) takes part in this CRP under contract № 24 154 with the aim to develop technologies for mass production of shock ignition, cryogenic fuel targets with a low initial aspect ratio because they are supposed to be more hydrodynamically stable during the implosion [2, 3]. A key area of research is the creation of methods and technologies with an emphasis on repetition systems [1]. For this purpose, the LPI proposes to use a unique free-standing target (FST) method [4, 5], which works with free-standing and line-moving targets. This makes it possible to economically produce a large number of fusion targets and inject them with the required rate at the focus of a powerful laser facility or an inertial fusion reactor. The preparatory stage before the formation of any targets is their filling with a hydrogen fuel, which is deuterium ( $D_2$ ) or deuterium-tritium mixture ( $D-T$ ). In the world practice, the target shells can be filled by diffusion of the gaseous fuel through the shell wall or by injection of the liquid fuel through the fill tubes a few tens of micrometers in diameter built into the shell wall. This report at the first time presents the results of modeling the project targets filling by diffusion up to pressures of 1250 atm at 300 K for various materials of the target shell. The issues of realizing an optimal filling procedure are discussed. It is based on a ramp filling regime with a constant pressure gradient, which allows one to avoid mechanical destruction of the targets during the entire filling cycle.

**Key words:** inertial confinement fusion, shock ignition cryogenic targets, fuel filling by diffusion.

DOI: 10.21517/0202-3822-2021-44-3-94-106

### ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время одно из перспективных направлений в области управляемого ИТС [1] предполагает использование метода ударного зажигания топлива в предварительно сжатой криогенной топливной мишени с помощью сфокусированной ударной волны (в зарубежной литературе — shock, or self-

ignition (SI)-режим). Для реализации этого подхода рассматриваются мишени прямого облучения с низким начальным аспектным отношением, поскольку предполагается, что именно такие мишени являются более гидродинамически устойчивыми в процессе имплозии [2, 3]. Основные проблемы здесь связаны с разработкой технологии массового производства низкоаспектных мишеней и необходимостью их частотной инжекции в камеру взаимодействия с мощным лазерным излучением [1].

В самом общем случае технологическая цепочка подготовки криогенных мишеней к лазерному эксперименту включает: производство сферических оболочек, заполнение их топливом (жидким или газообразным), формирование внутри оболочек топливного слоя (собственно, это и есть производство криогенной мишени с жидким или твёрдым слоем топлива), ускорение мишени до требуемых скоростей инжекции (>200 м/с), частотная доставка (инжекция) готовой мишени в камеру взаимодействия с лазерным излучением, контроль параметров криогенной мишени на различных этапах производства (качество оболочки, топливного слоя, траектории движения мишени и др.). Оболочка для криогенных мишеней (аблятор) изготавливается из пластика (СН), бериллия или углерода высокой плотности [1]. Подчеркнём, что для работы термоядерного реактора требуется ~1 миллион мишеней в сутки. Именно поэтому разрабатываемые в настоящее время методы формирования криогенных мишеней должны быть применимы или впоследствии легко адаптированы для массового производства мишеней с частотой повторения 10—15 Гц [1]. Последнее возможно лишь в случае использования свободно движущихся мишеней, или, другими словами, мишеней, незакреплённых на каком-либо подвесе. Такой подход давно развивается в ФИАН, где было предложено эффективное с точки зрения затрат производство мишеней для ИТС.

Предложение основано на использовании бесподвесных и поточно движущихся мишеней в технологических цепочках формирования топливного слоя и доставки уже готовых мишеней с заданной частотой (везде далее FST-подход) [4, 5]. FST-подход включает также разработку технологии производства топлива с различной структурой слоя (твёрдый кристаллический с различным уровнем дисперсности, включающий нанослои, а также жидкий) [6, 7], что позволяет экспериментально исследовать проблемы устойчивости и эффективности процесса имплозии. Кроме того, FST-подход обеспечивает минимизацию пространственных и временных масштабов при формировании и доставке криогенных мишеней, т.е. минимизирует запасы радиоактивного трития в системах ИТС и снижает стоимость производства мишеней.

### ДИФфуЗИОННОЕ ЗАПОЛНЕНИЕ МИШЕНЕЙ УДАРНОГО ПОДЖИГА

Исследования, проводимые в ФИАН в рамках координационного проекта МАГАТЭ «Энергия инерционного синтеза: исследования материалов и развитие технологий» [1], имеют своей целью разработку технологий для массового производства криогенных мишеней в частотном режиме. В проекте будут впервые исследованы мишени прямого облучения с низким начальным аспектным отношением, предназначенные для ударного поджига топлива (везде далее SI-мишень) [2, 3]. Технический подход для решения задач проекта — это разработка цикла формирования и бесконтактной доставки SI-мишеней, основанного на методе FST [4, 5].

Простейший вариант криогенной мишени для ударного поджига представляет полимерную (СН) оболочку и криогенный слой топлива (рис. 1). Геометрические параметры SI-мишеней, исследуемых в проекте, даны в табл. 1.

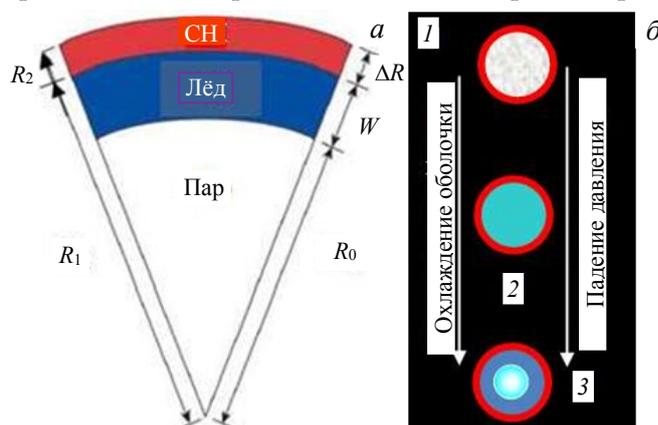


Рис. 1. Мишень ударного поджига (SI-мишень): а — геометрия SI-мишени; б — состояние топлива внутри СН-оболочки при её охлаждении в процессе формирования криогенного слоя; 1 — топливный газ, 2 — сжатая жидкость, 3 — двухфазное состояние «лёд + пар»

Т а б л и ц а 1. Геометрические параметры исследуемых мишеней [2, 3]

Варианты дизайна	Полимерная оболочка			Топливный слой		
	$R_2$ , мкм	$R_1$ , мкм	$\Delta R$ , мкм	$R_0$ , мкм	$W$ , мкм	$A_{cl}$
SI-1	1080	1049	31	888	161	5,5
SI-2	902	880	22	733	147	5
SI-3	815	791	24	593	198	3

При этом приняты следующие обозначения (пояснения на рис. 1):  $R_2$  — внешний радиус оболочки;  $R_1$  — внутренний радиус оболочки;  $\Delta R$  — толщина оболочки;  $R_0$  — радиус газовой полости (содержит насыщенный топливный пар);  $W$  — толщина криогенного слоя (изотопы водорода или их смеси);  $A_{cl}$  — начальное аспектное отношение криогенного слоя, определяемое соотношением  $A_{cl} = R_0/(R_1 - R_0) = R_0/W$ . Для низкоаспектных мишеней  $A_{cl} \sim 3-5$ .

Начальный подготовительный этап перед формированием криогенного слоя — это заполнение СН-оболочек топливным веществом. Стандартным способом заполнения является диффузия топливного газа через неповреждённую стенку оболочки [8—10]. Другая возможность — инжекция жидкого топлива внутрь оболочки через встроенный в её стенку капилляр. В этом случае крепление оболочки на подвесе, а также влияние наполняющих трубок (капилляров) на имплозию мишени остаётся в настоящее время нерешённой проблемой [11]. Поэтому мы рассмотрим первый вариант, который отработан на построенной в ФИАН установке (так называемая система заполнения) [8, 10]. Данная установка позволяет осуществлять диффузионное заполнение нерадиоактивным топливом бесподвесных оболочек до 1000 атм. при 300 К (полимерные оболочки) и 650 К (оболочки из стекла).

Чтобы получить криогенный слой значительной толщины, СН-оболочки предварительно заполняются до высокого внутреннего давления газообразным топливом из изотопов водорода, включая радиоактивный тритий в составе эквимольной D—T-смеси (50% молекул DT, 25% дейтерия ( $D_2$ ) и 25% трития ( $T_2$ )). Для реализации данного этапа (см. рис. 1, б, 1) необходимо знать параметры SI-мишеней, которые должны быть достигнуты при формировании двухфазного состояния топлива «лёд + пар» (см. рис. 1, б, 3) при заданной температуре  $T_{cl}$ . Согласно [2, 3] они имеют следующие значения:

— D—T-топливо:  $T_{cl} = 18,3$  К, плотность пара  $\rho_v = 0,3$  мг/см<sup>3</sup>, плотность D—T-льда  $\rho_s = 250$  мг/см<sup>3</sup>;

—  $D_2$ -топливо:  $T_{cl} = T_{tr} = 18,71$  К (температура тройной точки для  $D_2$ ), плотность пара  $\rho_v = 0,448$  мг/см<sup>3</sup>, плотность  $D_2$ -льда  $\rho_s = 196,7$  мг/см<sup>3</sup>.

Это позволяет рассчитать паспорт SI-мишеней, т.е. те исходные данные, которые будут определять весь ход процесса FST-формирования, а именно:  $V_{cl}$  (мм<sup>3</sup>) — объём твёрдого топлива;  $m_{cl}$  (мкг) — масса твёрдого топлива;  $V_v$  (мм<sup>3</sup>) — объём топливного пара в полости SI-мишени;  $m_v$  (мкг) — масса топливного пара;  $\rho_f$  (мг/см<sup>3</sup>) — плотность газообразного топлива в оболочке при  $T = 300$  К;  $P_f$  (атм.) — давление газообразного топлива в оболочке при  $T = 300$  К;  $M_f$  (мкг) — полная масса топлива. Полученные результаты приведены в табл. 2.

Т а б л и ц а 2. Параметры топливного слоя

Дизайн мишени	Топливо	$V_{cl}$	$m_{cl}$	$V_v$	$m_v$	$\rho_f$	$P_f$	$M_f$
SI-1	$D_2$	1,90	374,1	2,93	1,31	77,6	678,5	375,4
	D—T		475,5		0,88	98,5	692,9	476,4
SI-2	$D_2$	1,20	237,0	1,65	0,73	83,3	751,8	237,7
	D—T		301,2		0,49	105,7	775,3	301,7
SI-3	$D_2$	1,19	236,0	0,87	0,39	114,0	1248,1	236,4
	D—T		299,9		0,26	144,8	1228,7	300,2

Далее представлены результаты, полученные для SI-мишеней при их заполнении реальным газом (плотный  $D_2$ - или D—T-газ с межмолекулярным взаимодействием).

**Метод заполнения.** Рассмотрим режим, когда диффузионное заполнение осуществляется наиболее быстро, т.е. с помощью метода постоянного градиента давления (режим *gap filling*), разработанного в ФИАН [9, 10]. Данный метод характеризуется тем, что в ходе процесса заполнения разница между давлением снаружи и внутри СН-оболочки поддерживается постоянной и имеет максимально возможную величину, определяемую прочностью оболочки. Для лёгких газов с межмолекулярным взаимодействием, таких как изотопы водорода, уравнение Ван-дер-Ваальса [12] достаточно точно описывает экспериментальные данные при высоких давлениях заполнения. Именно это уравнение будет использоваться во всех наших расчётах, так как в нём участвуют только три параметра:  $R_G$ ,  $a$  и  $b$ . Его вид, устанавливающий зависимость между давлением  $P$ , температурой  $T$  и плотностью газа  $\rho$ , хорошо известен:

$$P = \frac{R_G T}{(\mu/\rho) - b} - \frac{a\rho^2}{\mu^2}, \quad (1)$$

где  $R_G$  — индивидуальная газовая постоянная;  $\mu$  — удельный молекулярный вес;  $a$  и  $b$  — параметры уравнения Ван-дер-Ваальса;  $T$  — абсолютная температура, которая при заполнении СН-оболочек равна  $T = 300$  К. Связь критических параметров индивидуального вещества с параметрами уравнения (1) определяется следующими соотношениями [12]:  $b = V_{cp}/3$ ,  $P_{cp} = a/(27b^2)$ ,  $T_{cp} = 8a/(27bR_G)$ , где  $T_{cp}$ ,  $P_{cp}$  и  $V_{cp} = 1/\rho_{cp}$  есть температура, давление и объём в критической точке. В табл. 3 даны значения критических параметров для чистых изотопов водорода и D—T-смеси.

Т а б л и ц а 3. Критические параметры (плотность, давление и температура) для изотопов водорода и D—T-смеси [13]

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

Особо подчеркнём, что любой режим заполнения оболочек топливным газом должен выдерживать (не превышать) разность между внешним и внутренним давлением на стенку оболочки, определяемую прочностью материала оболочки, чтобы гарантированно избежать её разрушения, особенно в случае заполнения радиоактивной D—T-смесью. Для этого необходимо знать зависимость от времени внутреннего давления, которое является функционалом от способа или режима подачи внешнего давления. При этом, поскольку требуемые плотности заполнения  $\rho_f$  для рассматриваемого класса SI-мишеней выше критических значений (можно сравнить в табл. 2 и 3), модель идеального газа заведомо не может быть использована для описания термодинамического состояния топлива в процессе заполнения СН-оболочек. Поэтому мы использовали нелинейное уравнение Ван-дер-Ваальса для расчёта зависимости давления от плотности (рис. 2). В качестве реперных точек (обозначены звёздочками) для D—T-смеси были взяты экспериментальные данные, приведённые в [14]. Верификация данных для D<sub>2</sub> осуществлялась с помощью уравнения Тиммерхауса, содержащего 24 константы [15].

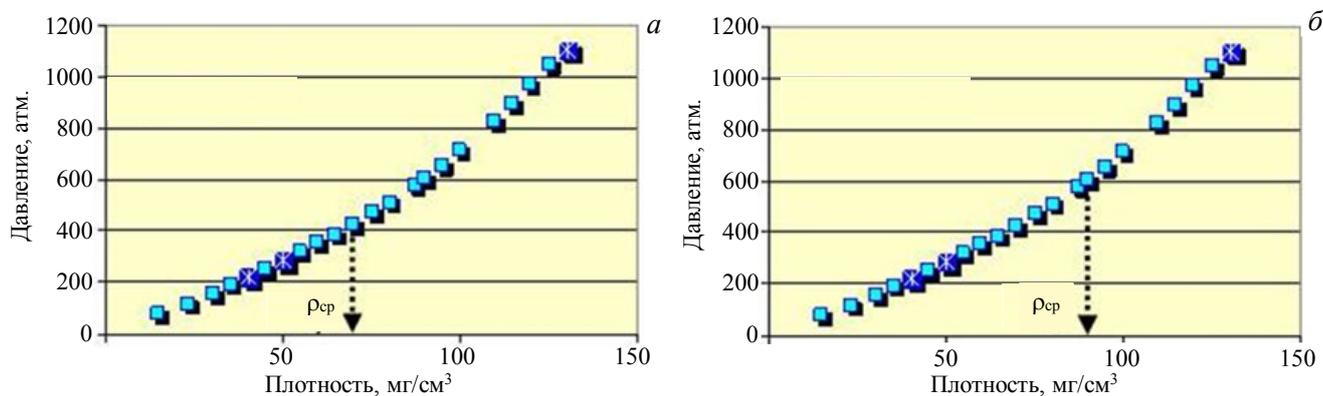


Рис. 2. Давление внутри оболочки при  $T = 300$  К как функция плотности газа для D<sub>2</sub> (а) и D—T-смеси (б)

При создании математической модели процесса заполнения тонкостенной сферы до высоких давлений был предложен подход, основанный на решении задачи Коши для нелинейных параболических уравнений с нелинейными граничными условиями [9, 10]. Нелинейность модели связана как с нелинейностью зависимости давления от плотности газа (уравнение Ван-дер-Ваальса), так и с влиянием некоторых параметров системы «СН-оболочка—D<sub>2</sub>/D—T-газ» на режим заполнения. Среди них зависимость прочности и газопроницаемости СН-оболочки от материала, метода изготовления и конструкции оболочки, от температуры и давления газа, от структурных изменений, накапливаемых в полимерах вследствие бета-распада трития, если таковые имеют место в материале оболочки при длительном времени заполнения [10]. Что касается конструкции оболочки, то в качестве кандидатов могут также рассматриваться многослойные оболочки с компактным и пористым полимерными слоями различной толщины и конфигурации, которые, в свою очередь, могут включать тонкое отражающее покрытие из материалов с высоким  $Z$  (например, золото,  $W_{Au} = 0,03$  мкм,  $\rho_{Au} = 19,3$  г/см<sup>3</sup>) [16]. Такой отражающий слой позволяет противостоять тепловой нагрузке в камере реактора с горячими стенками и сохранять качество криогенной мишени при её доставке в лазерный фокус.

**Время заполнения.** Реализация режима ramp filling от начального давления  $P_0$  до конечного  $P_f$  осуществляется с постоянным шагом по давлению  $\Delta P$  [9, 10]:

$$\Delta P = a_b P_b, \quad P_b = \frac{2E}{\sqrt{3(1-\nu^2)}} \delta^2, \quad \delta = \frac{\Delta R}{R_2}, \quad (2)$$

где  $P_b$  — внешнее давление разрушения;  $a_b$  — коэффициент запаса ( $a_b = 1 \rightarrow \Delta P = P_b = \Delta P_{\max}$ ), задаётся исходя из условий эксперимента;  $E$  — модуль Юнга для материала СН-оболочки мишени;  $\nu$  — коэффициент Пуассона, который может меняться в пределах 0,25—0,35, что слабо сказывается на результатах расчёта.

Время заполнения до конечного давления  $P_f$  запишется в виде [9, 10]

$$t_f = \tau \frac{P_f - P_0}{\Delta P}, \quad \tau = \frac{\tau_0}{\left(1 + \frac{P_0}{\beta}\right) \left(1 + \frac{P_f}{\beta}\right)}, \quad (3)$$

$$\tau_0 = \frac{\delta R_1^2}{3R_G K T}, \quad \beta = 3R_G T \rho_{\text{ср}} \quad (4)$$

где  $K$  — газопроницаемость стенки СН-оболочки. Отметим, что эффективное использование режима *ramp filling* требует точного знания первой производной давления по времени как функции времени (скорость заполнения). Используя соотношения (3), (4), легко найти искомое уравнение

$$\frac{dP}{dt} = \frac{\Delta P}{\tau_0} \frac{1 + \frac{P_0}{\beta}}{\left(1 - \frac{\Delta P}{\beta} \frac{t}{\tau_0}\right)^2}. \quad (5)$$

По существу, уравнение (5) определяет вид управляющей кривой, или, другими словами, закон, согласно которому давление должно подаваться в камеру заполнения, чтобы избежать разрушения СН-оболочек. Этот вопрос тесно связан с практической реализацией процедуры заполнения, так как в случае неидеального газа (газ Ван-дер-Ваальса) величина скорости заполнения  $dP/dt$  становится зависящей от времени. Кроме того, моделирование и расчёт скорости подачи давления необходимо проводить имея данные по возможной вариации коэффициентов газопроницаемости и прочности СН-оболочки (входят в уравнение (5)).

Далее представлены результаты, полученные при моделировании процесса заполнения топливным газом в режиме *ramp filling* ( $\Delta P = \text{const}$ ) для трёх исследуемых полимерных материалов: полиимид, полистирол и полимер, полученный методом GDP (*glow discharge polymer*), которые рекомендованы для криогенных мишеней ударного поджига [2, 3]. Исходные данные для расчётов приведены в табл. 4.

Т а б л и ц а 4. Свойства исследуемых полимерных материалов

Полимер	$E$ , ГПа	$K_{\text{H}_2}$	$K_{\text{D}_2}$	$K_{\text{DТ}}$
Полиимид [17—19]	3,2—15,0	$2,5 \cdot 10^{-14}$	$1,78 \cdot 10^{-14}$	$1,6 \cdot 10^{-14}$
Полистирол [20, 21]	1,0—3,2	$5,0 \cdot 10^{-15}$	$3,5 \cdot 10^{-15}$	$3,1 \cdot 10^{-15}$
GDP-полимер [22, 23]	1,4—2,6	$9,2 \cdot 10^{-15}$	$6,5 \cdot 10^{-15}$	$5,8 \cdot 10^{-15}$

Примечание:  $K$ , (моль·м)/(м<sup>2</sup>·с·Па) — коэффициент газопроницаемости СН-оболочки по отношению к изотопам водорода.

Значение модуля Юнга  $E = 3$  ГПа можно рассматривать как удобную реперную точку при сравнении исследуемых полимеров.

**Результаты моделирования.** Расчётное время заполнения мишени SI-1 с оболочкой из полиимида до конечного давления, величина которого согласно табл. 2 равна  $P_f = 679$  атм. для D<sub>2</sub> и  $P_f = 693$  атм. для D—Т, представлено в табл. 5.

Из табл. 5 хорошо видно, что расчёт процедуры заполнения позволяет определить время достижения внутреннего давления в оболочке на любой промежуточной стадии. При этом разрушение оболочки исключается, так как разница между давлением снаружи и внутри мишени не превышает заданной величины, определяемой прочностью оболочки (см. формулы (2)—(4)).

Т а б л и ц а 5. Время заполнения топливом ( $D_2/D-T$ ) мишени SI-1 с оболочкой из полиимида для двух значений модуля Юнга

Параметр	Время заполнения, ч				
	200 атм.	400 атм.	600 атм.	679 атм.	693 атм.
$E = 3$ ГПа, $a_b = 1,0$					
$D_2$	0,41	0,73	0,98	1,10	—
$D-T$	0,46	0,81	1,10	—	1,20
$E = 3$ ГПа, $a_b = 0,3$					
$D_2$	1,38	2,43	3,26	3,54	—
$D-T$	1,54	2,70	3,62	—	3,99
$E_2 = 15$ ГПа, $a_b = 0,3$					
$D_2$	0,28	0,49	0,65	0,71	—
$D-T$	0,31	0,54	0,72	—	0,81
$E_2 = 15$ ГПа, $a_b = 0,1$					
$D_2$	0,83	1,46	1,96	2,12	—
$D-T$	0,92	1,62	2,17	—	2,39

Однако если необходимо дополнительно снизить риск разрушения оболочки (например, за счёт обеспечения не столь высоких скоростей заполнения), то за счёт уменьшения величины  $a_b$  можно рассчитать кривую подачи давления в камеру заполнения для конкретного экспериментального случая. Так, например, для  $E = 3$  ГПа время заполнения оболочки SI-1 дейтерием до давления 679 атм. при максимально допустимом перепаде давления на её стенке, т.е., при  $a_b = 1$ , составит менее 70 мин. При этом скорость заполнения  $V_{\text{зап}}$  будет лежать в пределах от 6,9 атм./мин (начало процедуры заполнения) до 16,7 атм./мин (её окончание). Если необходимо обеспечить заполнение со скоростью, не превышающей 5 атм./мин, то этого можно достичь выбором коэффициента  $a_b = 0,3$ . При этом время заполнения увеличится до 3,5 ч.

Отметим также, что полученные результаты с очевидностью иллюстрируют тот факт, что для уменьшения времени заполнения и соответственно для уменьшения запасов трития в системе рекомендуется использовать более прочный полиимид. Это легко видеть из следующего сравнения: при  $E = 3$  ГПа время заполнения  $D-T$ -топливом составит  $\sim 4$  ч, а при  $E = 15$  ГПа уже менее 50 мин даже при коэффициенте запаса  $a_b = 0,3$ . Сделанный вывод является общим, так как именно высокая прочность СН-оболочки позволяет реализовать желаемые скорости заполнения и гарантированно избежать разрушения мишени на всех этапах её производства, включая и заполнение оболочек топливом.

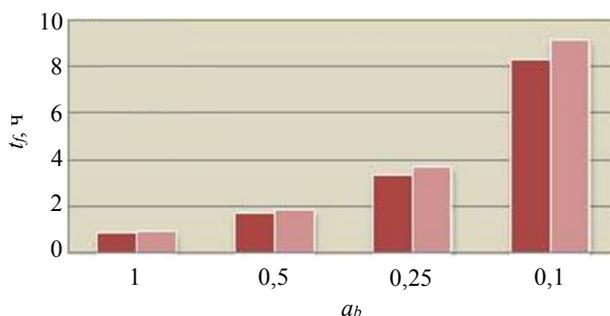
Аналогично рассчитывается ход процесса заполнения для мишеней SI-2 и SI-3. Для удобства суммируем полученные данные в табл. 6, рассчитанные для модуля Юнга  $E = 3$  ГПа и средней величины коэффициента запаса  $a_b = 0,5$ .

Т а б л и ц а 6. Время заполнения топливом (ч) для различного дизайна криогенных мишеней ударного поджига

Материал	Топливо	SI-1	SI-2	SI-3
Полиимид				
$K_{D_2} = 1,78 \cdot 10^{-14}$	$D_2$	2,12	1,86	1,65
$K_{DT} = 1,60 \cdot 10^{-14}$	$D-T$	2,39	2,11	1,82
Полистирол				
$K_{D_2} = 6,0 \cdot 10^{-15}$	$D_2$	6,30	5,52	4,98
$K_{DT} = 5,4 \cdot 10^{-15}$	$D-T$	7,10	6,25	5,49
GDP-полимер				
$K_{D_2} = 6,5 \cdot 10^{-15}$	$D_2$	5,82	5,10	4,60
$K_{DT} = 5,8 \cdot 10^{-15}$	$D-T$	6,60	5,82	5,11

Чтобы представить характерное изменение времени заполнения для всего используемого на практике диапазона значений коэффициента запаса ( $a_b = 1,0-0,1$ ), на рис. 3 демонстрируется изменение этой величины для мишени SI-3 с оболочкой из полиимида.

Прежде чем перейти к обсуждению возможности практической реализации полученных результатов, сделаем ещё одно важное замечание. Согласно уравнению (5) величина

Рис. 3. Время заполнения мишени SI-3 с оболочкой из полиимида ( $E = 3$  ГПа) для различных значений коэффициента запаса: ■ —  $D_2$ ; ■ —  $D-T$

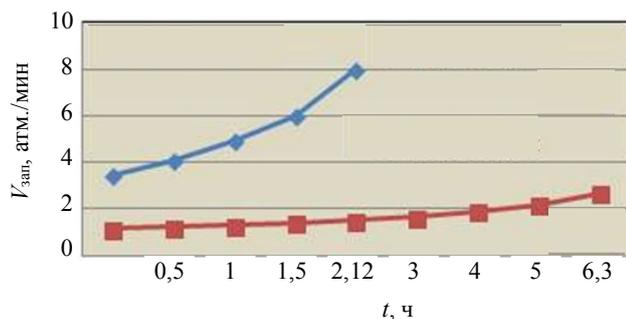


Рис. 4. Скорость заполнения дейтерием мишени SI-1 как функция времени для различных материалов оболочки ( $E = 3$  ГПа):  
 ◆ — полиимид; ■ — полистирол

скорости заполнения  $dP/dt$  является величиной, зависящей от времени, т.е. детальное моделирование и расчёт скорости подачи давления в камеру заполнения необходимо проводить для каждой отдельной партии оболочек. Имеется в виду точное знание свойств полимерных материалов, а именно коэффициентов газопроницаемости и прочности оболочки для рассматриваемого дизайна мишени. Рис. 4 наглядно иллюстрирует данное утверждение.

### СИСТЕМА ЗАПОЛНЕНИЯ, СОЗДАННАЯ В ФИАН

Как уже отмечалось, для подготовки мишеней ударного поджига к экспериментам по формированию криогенного слоя заполнение оболочек топливом может осуществляться либо диффузионным, либо инъекционным способом. Метод FST работает с оболочками, заполненными как тем, так и другим способом. Созданная в ФИАН система заполнения (СЗ) представляет собой автоматизированный комплекс, предназначенный для заполнения полых сферических оболочек до давления 1000 атм. методом диффузии. На рис. 5 показан общий вид СЗ, смонтированной в рабочем помещении с вытяжной вентиляцией с пятикратным обменом свободного объёма в час. Детальное описание СЗ дано в работах [8, 10]. Здесь мы лишь кратко перечислим параметры, важные для рассматриваемого класса мишеней:

- одновременное заполнение газом от 5 до 25 незакреплённых оболочек диаметром 0,4—2,0 мм;
- рабочий режим:  $\Delta P = \text{const}$  (режим ramp filling),  $P = \text{const}$  (режим step filling);

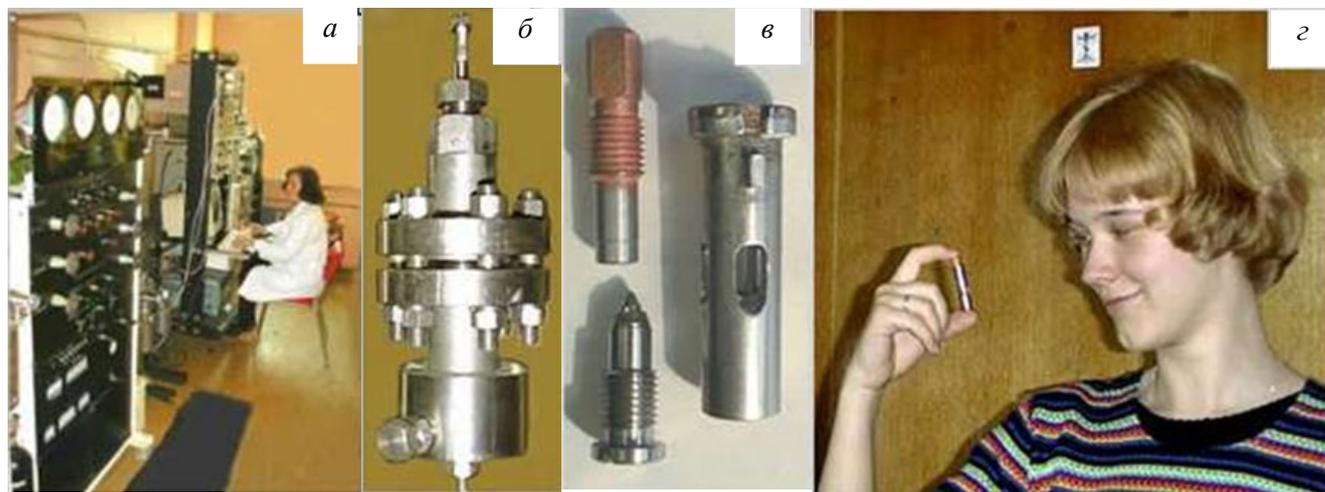


Рис. 5. Система заполнения (СЗ), построенная в ФИАН: а — общий вид СЗ; б — камера заполнения; в — МК; г — перенос МК от СЗ к МФ по методу FST

- рабочие газы:  $D_2$ ,  $H_2$ ,  $D_2 + H_2$ , инертные газы (неон, ксенон, аргон, гелий);
- рабочие температуры: 300 К (полимерные оболочки), 650 К (стеклянные оболочки);
- точность подачи давления: не хуже 0,1 атм.

**Тестирование работы СЗ.** Исследования проведены для широкого спектра значений давления газа внутри оболочки. Использование в экспериментах преимущественно водорода ( $H_2$ ) для тестирования СЗ обусловлено следующими факторами: изучаемые явления не зависят от вида топлива, время заполнения

оболочек водородом — наименьшее по сравнению с другими изотопами, водород — наиболее дешёвый изотоп. Для наглядной демонстрации работы СЗ используем схему проведения экспериментов по формированию криогенного слоя методом FST (рис. 6). Это имеет дополнительные преимущества с точки зрения актуализации возможностей метода FST, относящихся к частотному производству мишеней. Остановимся на этом вопросе подробнее на примере полимерных оболочек.

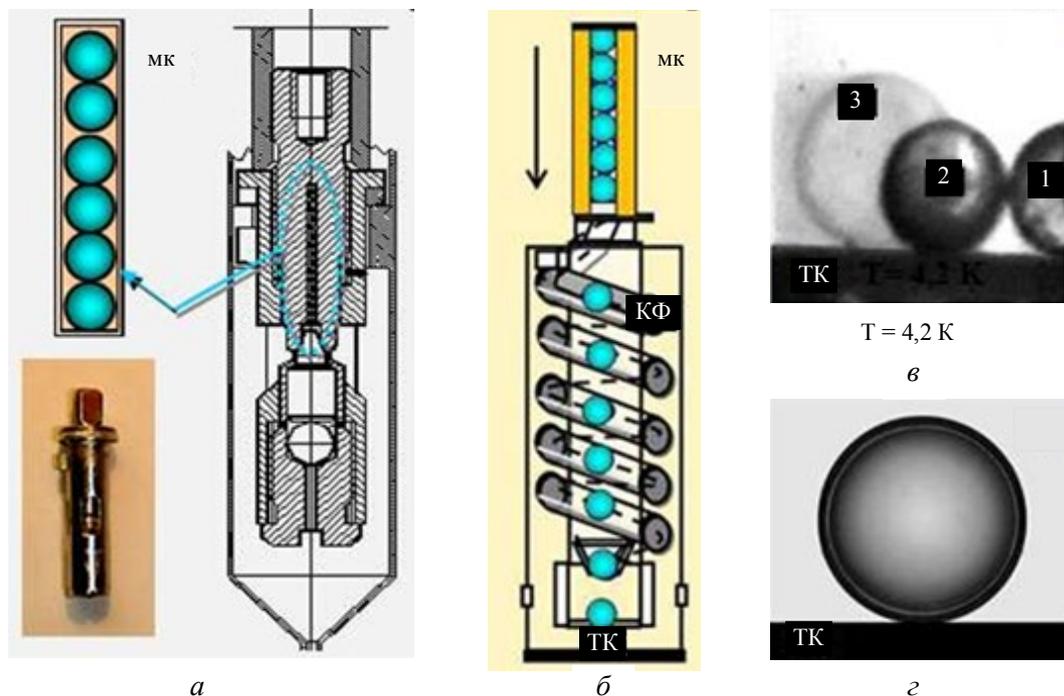


Рис. 6. Схема проведения экспериментов по методу FST: *а* — схема и общий вид МК для бесподвесных мишеней; *б* — схема МФ, обеспечивающая движение бесподвесных мишеней с жидким топливом в спиральном КФ в процессе вымораживания криогенного слоя на внутренней поверхности СН-оболочек; *в* — инъекция готовых мишеней из КФ в ТК при  $T = 4,2$  К в порядке следования: 1-я, 2-я, а затем 3-я мишень (момент касания дна ТК); *г* — криогенная мишень после инъекции ( $\varnothing 1620$  мкм (СН),  $W = 85$  мкм ( $D_2$ ))

В процессе заполнения незакреплённые оболочки размещаются в специальном мишенном контейнере (МК), как показано на рис. 6, *а*. После окончания процедуры заполнения при 300 К (первый подготовительный этап) МК переносится при той же температуре (300 К) от СЗ к модулю формирования (МФ) для проведения экспериментов по вымораживанию криогенного слоя в движущейся оболочке (метод FST, см. рис. 6, *б*). Перед началом экспериментов необходимо осуществить процедуру разгерметизации МК в условиях, исключающих как разрушение оболочки внутренним давлением, так и утечку из неё топлива вследствие обратной диффузии (второй подготовительный этап). Такая возможность появляется (см. рис. 1, *б*) лишь при условии понижения температуры, когда давление газа в оболочке падает, газопроницаемость её стенки снижается, а прочность материала оболочки растёт [21]. Поэтому МК с заполненными полимерными оболочками, находясь внутри МФ, охлаждается до температуры  $T_d$ , существенно более низкой, чем комнатная, для удаления топлива (жидкого или газообразного), находящегося вне оболочек.

Затем мишень инъецируется в канал формирования (КФ), где осуществляется быстрое (менее 15 с для мишеней диаметром  $\sim 2000$  мкм) формирование однородного и симметричного топливного слоя внутри оболочки по методу FST за счёт следующих особенностей [4, 5]:

— во-первых, мишень вращается в процессе своего гравитационного движения вниз вдоль КФ (КФ представляет собой одинарную, двойную или тройную спираль), что приводит к симметризации жидкого топлива внутри мишени;

— во-вторых, отвод тепла происходит за счёт теплопроводности через малое пятно контакта между оболочкой мишени и стенкой КФ. Спиральный КФ, представляющий собой вставку в криостат, охлаждается снаружи жидким или газообразным гелием. В процессе движения мишени внутри КФ пятно контакта движется по внешней поверхности вращающейся мишени, в результате чего происходит рав-

номерный переход топлива из жидкой в твёрдую фазу. Инжекция готовых мишеней из спирального КФ в тестовую камеру (ТК) показана на рис. 6, в, з;

— в-третьих, движущаяся мишень — это путь к реализации поточного производства мишеней и их частотной доставки. Именно поэтому метод FST был выбран в проекте МАГАТЭ как ключевое решение при разработке технологий, функционирующих в частотном режиме.

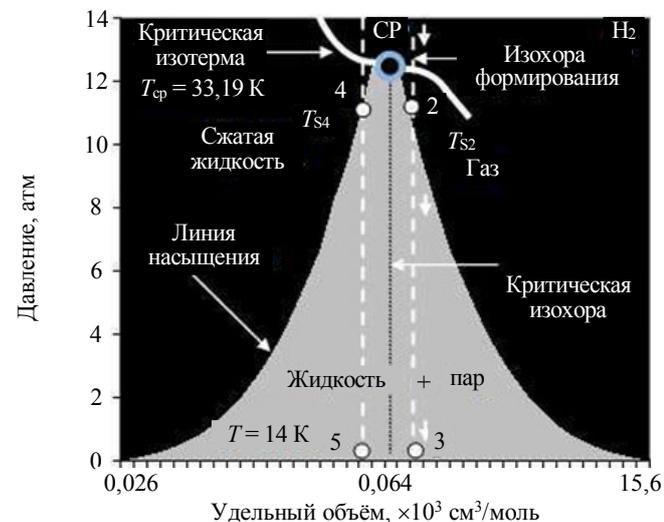


Рис. 7. Фазовая диаграмма  $H_2$  в координатах «давление—удельный объём»: СР — критическая точка; температура  $T_{S2}$  — внутри оболочки газ; температура  $T_{S4}$  — внутри оболочки сжатая жидкость (данные для построения диаграммы взяты из работы [13])

Формирование криогенной мишени методом FST представляет собой изохорический процесс. Фазовые превращения при этом контролируются температурой и фазовой диаграммой исследуемого вещества на плоскости «давление—объём» ( $P-V$ ). В нашем случае состояние  $H_2$  характеризуется отрезком прямой (изохора формирования, обозначенная на рис. 7 цифрами 1→2→3), опускающимся сверху вниз (мишень остывает). Переход «газ→жидкость» начинается, когда эта изохора пересекает линию насыщения в точке  $T_S$  (температура начала процесса разделения «газ→жидкость»). При дальнейшем охлаждении до температуры тройной точки  $T_{tr}$  (значения  $T_{tr}$  для изотопов водорода см. в табл. 7) и ниже происходит вымораживание слоя в оболочке, т.е. осуществляется переход «жидкость→твёрдая фаза» и образуется двухфазное состояние топлива «водородный лёд + пар» (или криогенная мишень).

Т а б л и ц а 7. Давление и температура для изотопов водорода в точках кипения и тройной точке [13]

Параметр	$H_2$	$D_2$	$T_2$	D—T
$T_{bp}$ , К	20,39	23,66	25,04	24,38
$P_{bp}$ , атм.	1,0	1,0	1,0	1,0
$T_{tr}$ , К	13,96	18,73	20,62	19,79
$P_{tr}$ , атм.	0,07	0,17	0,21	0,19

Выбор изохоры формирования определяется соотношением  $1/\rho_f$ , где  $\rho_f$  — плотность топливного газа при заполнении оболочки. Отметим, что производство криогенных слоёв по методу FST может иметь особенности в зависимости от того, в каком начальном фазовом состоянии находится топливо. Работа с начальной газовой фазой при  $\rho_f > \rho_{cp}$  (для SI-мишеней реализуется именно эта ситуация, см. табл. 2 и 3) будет возможна, если сброс давления в МК можно осуществить при температуре выше критической  $T_d > T_{cp}$ , причём существенную роль будет играть величина превышения над критической изотермой (см. рис. 7).

Сбросить давление в МК, когда топливо находится ещё в газообразном состоянии, возможно лишь при использовании оболочек из высокопрочных полимеров, так как давление в критической точке всё ещё значительно для всех изотопов водорода: 12,98 атм. ( $H_2$ ), 16,43 атм. ( $D_2$ ), 17,5 атм. (D—T) (см. табл. 3). Это означает, что для оболочек с низкой прочностью величина  $T_d$  может оказаться даже ниже температуры  $T_S$  (см. рис. 7), которая соответствует началу разделения топлива на жидкую и газообразную фазы, т.е. переходу топлива в двухфазное состояние при пересечении изохорой формирования линии насыщения. Отметим, что при дальнейшем понижении температуры давление в точке кипения ( $T_{bp}$ ) падает до величины  $P_{bp} = 1$  атм., а в тройной точке ( $T_{tr}$ ) не превышает  $P_{tr} < 0,22$  атм. для всех изотопов водорода (см. табл. 7). Суммируя сказанное, перечислим все возможности, определяемые  $P-V$ -диаграммой для  $\rho_f > \rho_{cp}$ :

- однофазное газообразное состояние топлива при  $T_d > T_{cp}$ ;
- критическое состояние соответствует области вблизи критической точки  $T_d \sim T_{cp}$ ;
- однофазное жидкое состояние соответствует области сжатой жидкости при  $T_S < T_d < T_{cp}$ ;
- двухфазное состояние «жидкость + пар» при  $T_{tr} < T_d < T_S$ .

При изменении температуры поведение границы раздела в двухфазном состоянии «жидкость + пар» зависит от давления заполнения, что может служить надёжным маркером при тестировании СЗ.

**Демонстрационные эксперименты.** В экспериментах использовались СН-оболочки из полистирола ( $E = 1$  ГПа, см. табл. 4) диаметром  $\sim 1000$  мкм с толщиной стенки  $\Delta R = 8$  мкм. Оболочки заполнялись водородом в СЗ при  $T = 300$  К, затем МК переносился в МФ, где осуществлялась его разгерметизация при температуре  $T = T_d$ . Следующий шаг — охлаждение оболочек от температуры  $T_d$  до  $T = 14,1$  К, что несколько выше температуры тройной точки  $T_{тр} = 13,96$  К (см. табл. 7). Для анализа экспериментов удобно ввести параметр  $\Theta = \rho_f/\rho_{cp}$ . Согласно табл. 3 для  $H_2$   $\rho_{cp} = 30,1$  мг/см<sup>3</sup>, а соответствующее давление заполнения по Ван-дер-Ваальсу равно  $P_b \sim 500$  атм. (рис. 8). Отметим, что для  $\Theta = 1$  в случае идеального газа давление было бы существенно ниже реального давления в оболочке и составило бы  $P_{и} \sim 366$  атм. В соответствии с формулой (2) для SI-мишеней даже при  $E = 3$  ГПа давление разрушения составляет менее  $P_b < 30$  атм., разность величин  $P_b - P_{и} > 130$  атм. Поэтому некорректный выбор уравнения состояния неизбежно привёл бы к разрушению оболочки в процессе её заполнения (сравним ход кривых на рис. 8, соответствующих идеальному газу и газу Ван-дер-Ваальса).

Проведение экспериментов осуществлялось следующим образом. Оболочки отогревались от температуры  $T = 14,1$  К до  $T \geq T_s$ . Особое внимание следует при этом уделить поведению границы раздела «жидкость—пар» для различных давлений заполнения и соответственно для различных значений параметра  $\Theta$ .

**Параметр  $\Theta < 1$ .** Плотность газа при заполнении  $\rho_f = 21$  мг/см<sup>3</sup>  $< \rho_{cp}$  ( $\Theta = 0,7$ ), давление заполнения  $P_f = 312$  атм. ( $t_f = 4,8$  ч,  $a_b = 0,5$ ). Результаты экспериментов для этого случая показаны на рис. 9. Фазовое состояние при  $T = 14,1$  К «жидкость + пар». По мере нагрева оболочки количество жидкой фазы уменьшается, диаметр газовой полости растёт, и при температуре  $T_{S2}$  внутри оболочки остаётся только газ (отогрев вдоль изохоры формирования  $3 \rightarrow 2 \rightarrow 1$ , см. рис. 7).

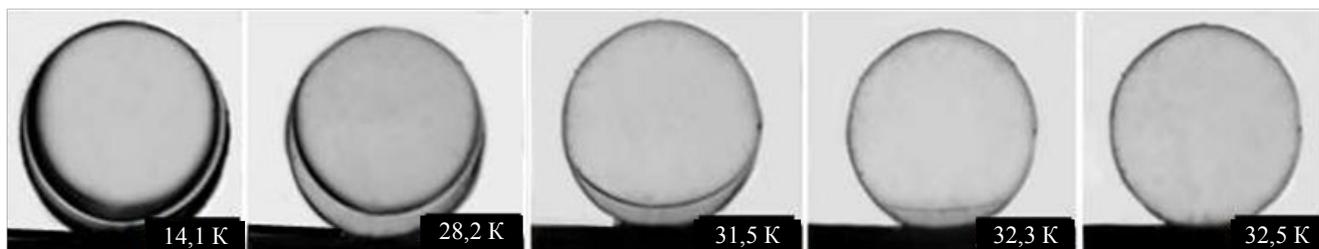


Рис. 9. Поведение границы раздела «жидкость—пар» при нагреве оболочки для случая  $\Theta < 1$  ( $\Theta = 0,7$ ,  $P_f = 312$  атм., последний кадр — в оболочке газообразный водород)

**Параметр  $\Theta > 1$ .** Плотность газа при заполнении  $\rho_f = 42$  мг/см<sup>3</sup>  $> \rho_{cp}$  ( $\Theta = 1,4$ ), давление заполнения  $P_f = 850$  атм. ( $t_f = 9,6$  ч,  $a_b = 0,5$ ). Результаты экспериментов показаны на рис. 10. Фазовое состояние при  $T = 14,1$  К «жидкость + пар». По мере нагрева оболочки количество жидкой фазы возрастает, диаметр газовой полости уменьшается. При достижении температуры  $T_{S4}$  (см. рис. 7) внутри оболочки находится водород в состоянии сжатой жидкости.

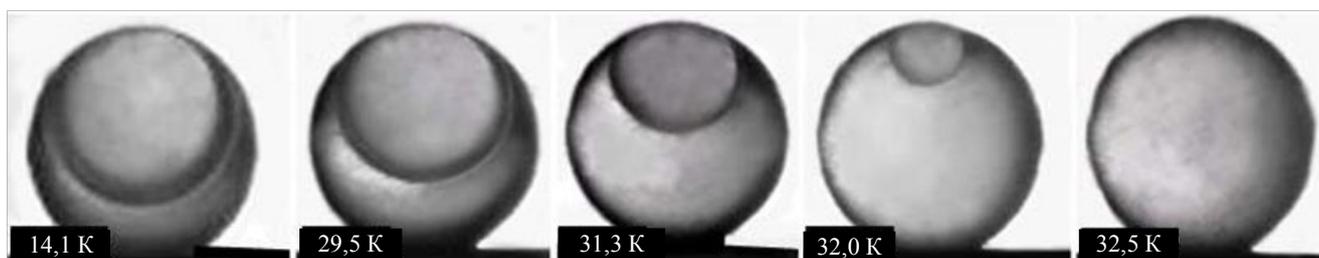


Рис. 10. Поведение границы раздела «жидкость—пар» при нагреве оболочки для случая  $\Theta > 1$  ( $\Theta = 1,4$ ,  $P_f = 850$  атм., последний кадр — в оболочке жидкий водород)

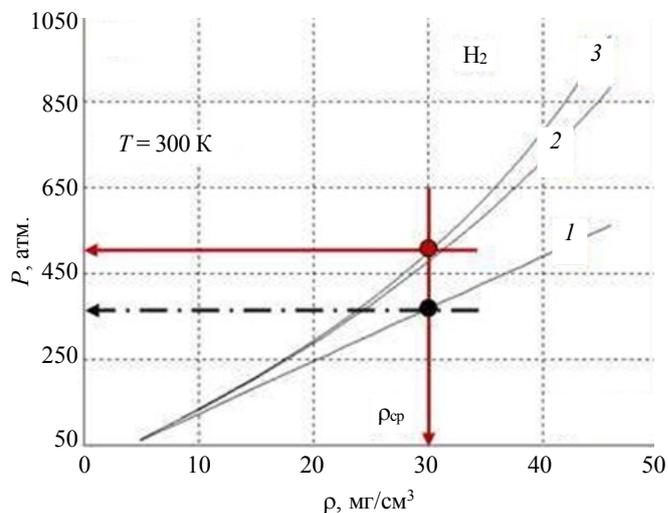


Рис. 8. Зависимость давления от плотности газа ( $H_2$ ) для различных уравнений состояния: 1 — уравнение идеального газа; 2 — уравнение Тиммерхауса; 3 — уравнение Ван-дер-Ваальса

Таким образом, данная серия экспериментов наглядно демонстрирует возможности СЗ при подготовке экспериментов по формированию криогенных мишеней ударного поджига методом FST. Расчёты показали, что в среднем SI-мишени могут быть заполнены до требуемых давлений за время от 1,65 ч (полиимид) до 7 ч (полистирол) при величине модуля Юнга  $E = 3$  ГПа и коэффициенте запаса  $a_b = 0,5$ , т.е. при вдвое меньшем перепаде давления на стенке оболочки относительно предельно допустимого значения (см. табл. 6). С ростом величины  $a_b$  время заполнения будет ещё меньше (см. рис. 3).

Отметим, что относительно небольшие времена заполнения являются следствием геометрии оболочки, так как при прочих равных условиях важным параметром является её толщина  $\Delta R$ . Для мишеней класса SI-1, SI-2 и SI-3 она составляет 31, 24 и 22 мкм соответственно.

Для сравнения приведём результаты по заполнению мишеней класса HiPER (High Power laser Energy Research) [24]. Базовый дизайн представляет собой тонкую полимерную сферическую оболочку ( $\varnothing \sim 2000$  мкм) с толщиной стенки  $\Delta R = 3$  мкм и с замороженным на её внутренней стороне топливным слоем  $W = 211$  мкм. Давление заполнения соответственно равно  $P_f = 951,52$  атм. для D<sub>2</sub>-топлива и  $P_f = 1046,63$  для D—T-топлива. Результаты расчёта представлены в табл. 8, согласно которой время заполнения составляет уже более суток для обоих видов топлива.

Т а б л и ц а 8. Время заполнения (ч) топливом мишени ВТ-2 с оболочкой из полиимида ( $E = 3$  ГПа,  $\Delta R = 3$  мкм,  $a_b = 0,5$ )

Топливо	$t_{f200}$	$t_{f400}$	$t_{f600}$	$t_{f800}$	$t_{f1000}$
D <sub>2</sub>	7,8	13,7	18,4	22,2	25,3
D—T	8,7	15,3	20,4	24,7	28,1

**Практическая реализация полученных результатов.** Согласно проведённым расчётам для мишеней класса SI-1 и SI-2 давление заполнения не превышает 800 атм. при 300 К для обоих видов топлива (D<sub>2</sub> и D—T), и, следовательно, такие мишени могут быть заполнены до требуемых давлений при использовании существующей СЗ (см. рис. 10,  $P_f = 850$  атм.). Что касается мишени SI-3, то для неё давление заполнения составляет  $P_f = 1250$  атм. при 300 К, т.е. выше верхнего предела работы СЗ, равного 1000 атм. Однако конструкция СЗ позволяет модернизировать её работу с целью расширения рабочего диапазона давлений до требуемых значений [10].

Ещё раз подчеркнём следующее важное обстоятельство. Для безопасного, т.е. без разрушения, заполнения полимерных оболочек топливом необходимо знать зависимость от времени внутреннего давления в оболочке, которое является функционалом от способа подачи внешнего давления. При этом, поскольку газ при высоком давлении не является идеальным (это уже плотный газ с межмолекулярным взаимодействием), то расчёт процедуры заполнения может осуществляться только при надлежащем выборе уравнения состояния для заданного топливного вещества. Кроме того, совершенно необходимо точное знание исходной базы данных по свойствам полимеров, предлагаемых в качестве материалов для оболочек SI-мишеней, среди которых особое место занимают прочностные параметры и коэффициенты газопроницаемости материала стенки оболочки. Отметим также, что вопросы адаптации СЗ для работы с DT-топливом детально рассмотрены в работах [10, 24].

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Координационный проект в рамках МАГАТЭ «Энергия инерционного синтеза: исследования материалов и развитие технологий» направлен на продвижение фундаментальных исследований и технологий термоядерных материалов в тесной связи с разработкой технологий массового производства криогенных топливных мишеней с высоким усилением по энергии, формируемых в частотном режиме и с учётом их последующей инжекции в лазерный фокус.

ФИАН активно принимает участие в текущих исследованиях по данному проекту, одним из направлений которых является разработка технологий массового производства криогенных топливных мишеней ударного поджига с низким начальным аспектным отношением.

В основе технического подхода для решения поставленной задачи лежит метод FST, разработанный в ФИАН для формирования топливного слоя в движущихся бесподвесных оболочках. Это позволяет производить криогенные мишени в непрерывном режиме или с заданной частотой, что является необходимым условием проекта МАГАТЭ.

Программа исследований по проекту включает следующие направления:

— экспертный анализ основных требований, относящихся к ключевым научным и технологическим вопросам для SI-мишеней с целью координации экспериментальных и расчётно-модельных исследований при выборе свойств материалов и разработке методологий, которые применимы к массовому производству мишеней;

— математическое моделирование и разработка вычислительных кодов отклика SI-мишеней в процессе FST-цикла, в том числе заполнение топливным газом—формирование топливного слоя—бесконтактная доставка;

— экспериментальное моделирование рабочих условий функционирования ключевых элементов FST-цикла с целью оценки и подтверждения их эффективности для массового производства мишеней и их бесконтактной доставки;

— разработка схемы интеграции всех процессов, что позволит продвинуть предлагаемые технологии на реакторный уровень.

В настоящей статье представлены результаты, полученные при выполнении задач 1—3 для этапа диффузионного заполнения массива бесподвесных сферических полимерных оболочек газообразным топливом до давления в диапазоне от 670 до 1250 атм. при 300 К. Это наиболее дешёвый и экспериментально отработанный вариант осуществления подготовительного этапа, причём такой, который не нарушает качество оболочки и, следовательно, не влияет на симметрию сжатия мишени, как это может быть при инъекции жидкого топлива через тонкий капилляр, встроенный в стенку оболочки.

Проведённый цикл теоретических и экспериментальных исследований показал:

— SI-мишени могут быть заполнены до требуемых давлений за достаточно короткое время — всего за несколько часов, а при использовании прочных полимеров для оболочек SI-мишеней даже за время менее часа;

— существующая в ФИАН СЗ позволяет реализовать требуемые режимы работы установки, т.е., такие режимы, при которых время заполнения оболочки минимально (режим *ramp filling*), возможность её разрушения внешним и внутренним давлением исключена, а обратная утечка газа в процессе хранения или транспортировки оболочек отсутствует;

— использование более прочных полимеров предоставляет и более широкие возможности с точки зрения снижения рисков не только при заполнении оболочек топливом, но и при реализации всех ступеней подготовки мишеней к экспериментам по формированию топливного слоя методом FST.

Данная работа выполнена при финансовой поддержке МАГАТЭ в рамках научного проекта № 24154 «Моделирование деградации оптики под воздействием ионизирующего излучения и массовое производство низкоаспектных мишеней для импульсно-периодической энергетической установки на основе ИТС» («Modelling of the Optics Degradation Under Ionizing Radiation and Mass Fabrication of Low Aspect-Ratio Targets for a Repetition-Rate IFE Facility»), а также в рамках ГЗ ФИАН и по программе Президиума РАН.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Pathways** to Energy from Inertial Fusion: Materials Research and Technology Development. <https://www.iaea.org/projects/crp/f13020>.
2. **Brandon V., Canaud B., Temporal M., Ramis R.** Low initial aspect-ratio direct-drive target designs for shock- or self-ignition in the context of the laser Megajoule. — *Nuclear Fusion*, 2014, vol. 54 (8), p. 083016.
3. **Shang W.L., Betti R., Hu S.X., Woo K., Hao L. et al.** Electron shock ignition of inertial fusion targets. — *Phys. Rev. Lett.*, 2017, vol. 119, p. 195001.
4. **Aleksandrova I.V., Koshelev E.L., Koresheva E.R.** In-line targetp for laser IFE. — *Applied Sci.*, 2020, vol. 10, p. 686 (17 pages); <http://dx.doi.org/10.3390/app10020686>.
5. **Aleksandrova I.V., Koresheva E.R.** Advanced fuel layering in line-moving, high-gain direct-drive cryogenic targets. — *High Power Laser Science and Engineering*, 2019, vol. 7, p. e38 (15 pages); <https://doi.org/10.1017/hpl.2019.23/>.
6. **Aleksandrova I.V., Koresheva E.R., Osipov I.E., Panina L.V.** Cryotargets for modern ICF experiments. — *Laser and Particle Beams*, 1996, vol. 6, № 2, p. 539.
7. **Aleksandrova I.V., Koresheva E.R., Osipov I.E., Belolipetskiy A.A., Panina L.V. et al.** Ultra-fine fuel layers for application to ICF/IFE targets. — *Fusion Sci. Technol.*, 2013, vol. 63, p. 106.

8. **Osipov I.E., Koresheva E.R., Baranov G.D. 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.
9. **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.
10. **Александрова И.В., Белолипецкий А.А., Корешева Е.Р., Кошелев Е.Л., Осипов И.Е. и др.** Оптимизация процесса заполнения массива двухслойных полимерных оболочек газообразным D<sub>2</sub>- или D—T-топливом до давлений 1000 атм.: математическое моделирование и подготовка эксперимента. — *ВАНТ. Сер. Термоядерный синтез*, 2011, вып. 4, с. 22.
11. **Kline J. L., Batha S. H., Benedetti L. R. et al.** Progress of indirect drive inertial confinement fusion in the United States. — *Nuclear Fusion*, 2019, vol. 59 (11), p. 112018.
12. **Гурвич Л.В., Вейц И.В., Медведев В.А., Хачкурузов Г.А., Юнгман В.С. и др.** Термодинамические свойства индивидуальных веществ. — М.: Наука, 1982. 560 с.
13. **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.
14. **Fagaly R.L., Alexander N.B., Mangano R.A., Bourque R.F., Bittner D.N. et al.** The cryogenic target delivery system for OMEGA Upgrade. — In: 39th National Symposium of the Amer. Vac. Soc. Chicago, November 9—13, 1992.
15. **Prydz R., Timmerhaus K.D., Stewart R.B.** The thermodynamic properties of deuterium. — *Adv. Cryo. Eng.*, 1968, vol. 13, p. 384.
16. **Bodner S.E., Colombant D.G., Schmitt A.J., Klapisch M.** High gain target design for laser fusion. — *Phys. Plasmas*, 2000, vol. 7 (6), p. 2298.
17. **Takekoshi. T.** Polyimides: fundamentals and applications. — *Plastic Engineering*, Eds. M.K. Ghosh and K.L. Mittal. 1966, vol. 36 (Markel Dekker, NY), p. 7.
18. **Sethian J.D., Friedman M., Lehberg R.H., Myers M., Obenschain S.P. et al.** Fusion energy with lasers, direct drive targets, and dry wall chambers. — *Nuclear Fusion*, 2003, vol. 43, p. 1693.
19. **Marsacq D., Dufour B., Blondel B., Lavergne Y., Thevenot G.** High-performance aromatic polyimides for inertial confinement fusion experiment. — *Polymer International*, 2000, vol. 49, Issue 9, p. 1021.
20. **Kobayashi S., Norimatsu T., Nakai M., Tanaka K.A., Yamanaka T., Nakai S.** Annealing of polystyrene microcapsules for inertial confinement fusion experiments. — *J. Vac. Sci. Technol.*, 1991, vol. 9(1), p. 150.
21. **Крыжановский В.К., Бурлов В.В., Паннатченко А.Д., Крыжановская Ю.В.** Технические свойства полимерных материалов. Справочник. 2-е изд., дополненное. — С-Пб: Изд-во «ПРОФЕССИЯ», 2007. 280 с.
22. **Nikroo A., Czechowicz D.G., Castillo E.R., Pontelandolfo J.M.** Production of higher strength thin walled glow discharge polymer shells for cryogenic experiments at OMEGA. — In: *Inertial Fusion Science and Applications*, 2001 (eds. K.A. Tanaka, D.D. Meyerhofer, J. Meyer-ter-Vehn), ELSEVIER, 2002, p. 794—797.
23. **ICF Handbook 2005.** Fabrication, Characterization, and Production of Equipment and Targets Produced and Manufactured by General Atomics and Schafer Corporation; [http://fusion.gat.com/icf/ICF\\_Catalog/catalog.pdf](http://fusion.gat.com/icf/ICF_Catalog/catalog.pdf).
24. **Aleksandrova I.V., Belolipetskiy A.A., Kalabuhov V.A., Koresheva E.R., Koshelev E.L. et al.** FST-technologies for high rate production of HiPER-scale cryogenic targets. — In: *Proc. of SPIE*, 2011, vol. 8080, p. 80802M.



Ирина Владимировна Александрова, к.ф.-м.н., специалист по проблемам формирования и частотной доставки криогенных топливных мишеней для ИТС, участник многих научных российских и международных проектов, включая проекты РФФИ и МАГАТЭ; Физический институт им. П.Н. Лебедева Российской академии наук, 119991 Москва, Ленинский пр. 53, Россия



Елена Ростиславовна Корешева, д.ф.-м.н., профессор, руководитель Лаборатории нейтронной физики, а также многих научных российских и международных проектов, включая проекты РФФИ и МАГАТЭ по проблемам формирования и частотной доставки криогенных топливных мишеней для ИТС; Физический институт им. П.Н. Лебедева Российской академии наук, 119991 Москва, Ленинский пр. 53, Россия

Статья поступила в редакцию 16 марта 2021 г.

После доработки 14 июля 2021 г.

Принята к публикации 20 июля 2021 г.

Вопросы атомной науки и техники.

*Сер. Термоядерный синтез*, 2021, т. 44, вып. 3, с. 94—106.