

УДК 621.039.633

## КРИОГЕННЫЕ МИШЕНИ ПРЯМОГО СЖАТИЯ С ВЫСОКИМ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИМ ВЫХОДОМ: ДИФФУЗИОННОЕ ЗАПОЛНЕНИЕ ТОПЛИВОМ

И. В. Александрова<sup>1</sup>, Е. Р. Корешева<sup>1,2</sup>, Е. Л. Кошелев<sup>1</sup>

*Для обеспечения непрерывной работы реактора на основе инерциального термоядерного синтеза (ИТС) необходимо пополнение топливом зоны термоядерного горения с частотой  $\sim 1$  миллиона мишеней в день. Первый этап в производстве мишеней – это диффузионное заполнение полимерных (СН) оболочек газообразным топливом, представляющим собой дейтерий ( $D_2$ ) или дейтерий-тритиевую смесь (DT). Представлены результаты моделирования по заполнению СН-оболочек реакторного класса ( $\varnothing \sim 4$  мм) до давления  $\sim 1100$  атм при 300 К в режиме с постоянным градиентом давления. Рассматриваются простые и двухслойные оболочки из компактного и пористого полимера. Обсуждаются вопросы построения оптимальной схемы DT-заполнения, позволяющей избежать разрушения СН-оболочки вследствие бета-распада трития.*

**Ключевые слова:** инерциальный термоядерный синтез, реакторные мишени, диффузионное заполнение оболочек топливным газом.

*Введение.* В настоящее время существует множество конструкций криогенной топливной мишени (КТМ) для различных концепций энергетических станций инерциального термоядерного синтеза (ИТС). В данной работе исследуется сферическая КТМ с высоким энергетическим выходом, предложенная Боднером с соавторами [1]. Структура и параметры КТМ Боднера даны в табл. 1 и на рис. 1.

Первый этап цикла формирования КТМ – это диффузионное заполнение полимерных оболочек (СН-оболочек) газообразным топливом ( $D_2$ - или DT-смесь). В си-

<sup>1</sup> ФИАН, 119991 Россия, Москва, Ленинский пр-т, 53; e-mail: ivaaleks@gmail.com.

<sup>2</sup> НИЯУ МИФИ, 115409 Россия, Москва, Каширское ш., 31; e-mail: koresh@sci.lebedev.ru.

лу небольшой прочности стенки СН-оболочек, реализация этого процесса – сложная технологическая задача. В случае DT-смеси в процессе диффузионного заполнения, в стенке СН-оболочки возникают радиационные дефекты (под воздействием бета-распада трития), что дополнительно снижает прочность стенки. Кроме того, при работе с DT-смесью возникает проблема минимизации объема трития в системе заполнения. Все эти вопросы требуют не только тщательного анализа процесса заполнения одно- и многослойных СН-оболочек, используемых в конструкции КТМ, но также проведения детальных оптимизационных расчетов. Ниже мы представляем результаты, полученные для КТМ Боднера при ее заполнении реальным газом (плотный  $D_2$  или DT газ с межмолекулярным взаимодействием).

Т а б л и ц а 1

Параметры КТМ Боднера.  $D_i$  и  $D_0$  – внутренний и внешний диаметры каждого слоя,  $\Delta_i$  и  $\rho_i$  – толщина и плотность каждого слоя

Вещество слоя	$D_i$ (мкм)	$\Delta_i$ (мкм)	$D_0$ (мкм)	$\rho_i$ (мг/см <sup>3</sup> )
DT (пар)	0	3000	3000	$0.3 \cdot 10^{-3}$
DT (лед)	3000	190	3380	0.25
СН-пена+DT (лед)	3380	261	3902	0.25775
СН-оболочка	3902	1	3904	1.07
Золото (Au)	3904	0.03	3904.06	19.3

*Метод заполнения.* Рассмотрим режим, когда диффузионное заполнение осуществляется наиболее оптимально, т.е. с помощью метода постоянного градиента давления (режим *ramp filling*), разработанного в ФИАН [2]. Данный метод характеризуется тем, что в процессе заполнения разница между давлением снаружи и внутри СН-оболочки

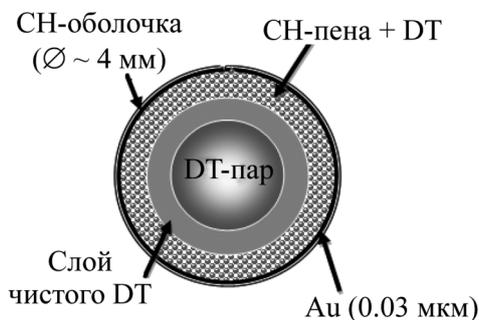


Рис. 1: Конструкция КТМ Боднера.

поддерживается постоянной и имеет максимально возможную величину, определяемую прочностью оболочки. Для легких газов с межмолекулярным взаимодействием, таких как изотопы водорода, уравнение Ван-дер-Ваальса достаточно хорошо описывает экспериментальные данные, и именно это уравнение будет использоваться в расчетах. Его вид, устанавливающий связь между давлением  $P$ , температурой  $T$  и плотностью газа  $\rho$ , находящегося в термодинамическом равновесии, хорошо известен:

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

где  $R_G$  – газовая постоянная,  $\mu$  – масса одного моля газа. Связь критических параметров вещества с параметрами уравнения Ван-дер-Ваальса определяется следующими соотношениями:  $b = V_{\text{кр}}/3$ ,  $P_{\text{кр}} = a/(27b^2)$ ,  $T_{\text{кр}} = 8a/(27bR_G)$ , где  $T_{\text{кр}}$ ,  $P_{\text{кр}}$  и  $\rho_{\text{кр}}$  – температура, давление и плотность вещества в критической точке. Температура заполнения для СН-оболочек составляет величину  $T_f = 300$  К.

При создании математической модели процесса заполнения тонкостенной сферической СН-оболочки до высоких давлений был предложен подход, основанный на решении задачи Коши для нелинейных параболических уравнений с нелинейными граничными условиями. Нелинейность модели связана как с нелинейностью зависимости давления от плотности газа (см. уравнение (1)), так и с влиянием некоторых параметров системы “СН-оболочка –  $D_2/DT$  газ” на режим заполнения. Среди них: зависимость прочности и газопроницаемости СН-оболочки от материала и геометрии КТМ (см. табл. 1), от температуры и давления газа, от структурных изменений, накапливаемых в полимерах вследствие бета-распада трития, и т.д. Поэтому нами были проведены исследования в области создания математической модели диффузионного заполнения с учетом зависимости от времени прочности и газопроницаемости СН-оболочек [2, 3]. Этот опыт будет использован нами при рассмотрении вопроса о заполнении КТМ Боднера.

*Время заполнения.* Реализация режима *ramp filling* от начального давления  $P_{i0} = P_0$  до конечного  $P_f$  осуществляется с постоянным шагом по давлению  $\Delta P$ :

$$\Delta P = a_b P_b, \quad P_b = \frac{2E}{\sqrt{3(1-\nu^2)}} \cdot \delta^2, \quad \delta = \frac{\Delta r}{r_0}, \quad (2)$$

где  $P_b$  – внешнее давление разрушения,  $a_b$  – коэффициент запаса, выбираемый исходя из качества СН-оболочки или условий эксперимента,  $E$  – модуль Юнга материала СН-оболочки,  $\nu$  – коэффициент Пуассона,  $\Delta r = r_0 - r_1$  – толщина СН-оболочки,  $r_0$  и  $r_1$  – внешний и внутренний радиусы СН-оболочки. Здесь и далее величина  $a_b = 1.0$ ,

если не сделано соответствующих оговорок. Время заполнения СН-оболочки газом до конечного давления  $P_f$  запишется в виде [2]:

$$t_f = \frac{(1 - \delta)\kappa}{\lambda\delta \left(1 + \frac{P_0}{\beta}\right) \left(1 + \frac{P_f}{\beta}\right)} \frac{(P_f - P_0)}{\Delta P} + o(\delta),$$

$$\beta = 3R_G T \rho_{\text{ср}}, \lambda = \frac{3R_G T}{\delta r_0 r_1}, \delta = \frac{r_0 - r_1}{r_0}, \kappa = \frac{\delta}{K}, \quad (3)$$

где  $K$  – газопроницаемость однослойной СН-оболочки.

Чтобы реализовать требуемые параметры КТМ Боднера (табл. 1), конечное давление заполнения  $P_f$  согласно уравнению (1) составит  $\sim 1100$  атм как для  $D_2$ -, так и для ДТ-топлива. При этом соответствующие плотности газа равны  $\rho_f^{D_2} = 107.21$  мг/см<sup>3</sup> и  $\rho_f^{DT} = 136.15$  мг/см<sup>3</sup>.

Формула (3) может быть представлена в более удобном виде:

Идеальный газ (для сравнения):

$$t_f = \tau_0 \frac{P_f - P_0}{\Delta P}, \quad \tau_0 = \frac{\delta r_1^2}{3R_G K T}, \quad (4a)$$

тогда скорость заполнения будет

$$\frac{dP}{dt} = \frac{\Delta P}{\tau_0} = \text{const.} \quad (4b)$$

Газ Ван-дер-Ваальса:

$$t_f = \tau \frac{P_f - P_0}{\Delta P}, \quad \tau = \frac{\tau_0}{\left(1 + \frac{P_0}{\beta}\right) \left(1 + \frac{P_f}{\beta}\right)}. \quad (5a)$$

Тогда скорость заполнения

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

Формула (5a) свидетельствует о том, что параметр  $\tau$ , являющийся временной константой в случае идеального газа, становится величиной, зависимой от давления для газа Ван-дер-Ваальса (5b). Кроме того, для эффективной реализации режима *ramp filling* необходимо точно знать коэффициенты газопроницаемости и прочности СН-оболочки для рассматриваемой конструкции КТМ. Остановимся на этом вопросе подробнее.

*Газопроницаемость.* В нашей модели коэффициент газопроницаемости для двухслойной СН-оболочки в зависимости от  $P$  и  $r$  задается в виде [2]:

$$k(p, r) = k_0(r)(1 + \xi P)^{\gamma_1} \left( \frac{P}{P_0} \right)^{\gamma_2}, \quad (6)$$

где  $\xi$ ,  $\gamma_1$  и  $\gamma_2$  – безразмерные коэффициенты.

Газопроницаемость (и, конечно же, механическая прочность) СН-оболочки является функцией структуры стенки оболочки. Наиболее сильно это проявляется при ее заполнении ДТ-смесью, так как радиационные дефекты, накапливаясь со временем, приводят к структурным изменениям в полимерных материалах. В свою очередь, эти изменения ведут к изменению прочности и газопроницаемости СН-оболочки, которые можно рассматривать как функции от времени заполнения. Правильный выбор математической модели для процесса заполнения СН-оболочки ДТ-смесью позволит предложить практические рекомендации при построении системы заполнения.

Начнем с рассмотрения двух простых случаев, когда радиационные дефекты не оказывают влияния на газопроницаемость и прочность полимера. Тогда формула (6) запишется в виде:

$$\text{Случай А: } \gamma_1 = \gamma_2 = 0, k_0(r) = K = \text{const}\{\text{СН-оболочка } \Delta r_1 = r_0 - r_1\}. \quad (6a)$$

**Случай В:**

$$\gamma_1 = \gamma_2 = 0, k_0(r) = \begin{cases} k_1, & r_1 < r \leq r_0 \\ k_2, & r_2 \leq r < r_1 \end{cases}$$

$$\{\text{СН-оболочка } (\Delta r_1 = r_0 - r_1) + \text{СН-пена } (\Delta r_2 = r_1 - r_2)\}.$$

Отметим, что, в соответствии с [4], в зависимости от наличия и размеров микропор в структуре материала различают диффузионную газопроницаемость (случай, когда поры отсутствуют) и фазовую газопроницаемость (поры присутствуют). Таким образом, внешняя СН-оболочка из компактного полимера подчиняется законам диффузионной газопроницаемости, а внутренний, пористый полимерный слой (СН-пена) – законам фазовой газопроницаемости. Причем, в зависимости от соотношения диаметра пор ( $d$ ) и длины свободного пробега молекул газа ( $\lambda$ ), фазовая газопроницаемость подразделяется на следующие виды: молекулярный (или кнудсеновский) поток, когда  $d < \lambda$ ; поток Пуазейля (или ламинарный поток), когда  $d > \lambda$ .

Длина свободного пробега молекул водорода ( $\text{H}_2$ ) и  $\text{D}_2$  при 1 атм равна  $11.77 \cdot 10^{-6}$  см или  $\sim 0.12$  мкм, причем  $\lambda$  снижается обратно пропорционально росту давления. Таким образом, при размере пор более 0.1 мкм, под действием разности давлений через пористый слой осуществляется ламинарный поток.

Отметим, что в литературе отсутствуют данные относительно газопроницаемости пористого слоя (СН-пена) в КТМ Боднера [4, 5]. Поэтому в расчетах мы воспользуемся введением масштабных коэффициентов  $\Theta$ , как это было сделано в работе [3].

*Прочность.* Конструкция КТМ может быть простой (полимерная оболочка + топливный лед), а может состоять из нескольких частей (напр., как КТМ Боднера, см. табл. 1). Прочность отдельных частей оболочки и конструкции как целого может быть различной. Это означает, что для многослойной КТМ ее прочность зависит не только от прочности полимерного материала, но и от количества и конфигурации слоев оболочки. Два случая представляются важными для последующего анализа:

**Случай С:** *двухслойная полимерная оболочка работает как простая однослойная.* Это может зависеть от следующих обстоятельств: внешняя СН-оболочка из компактного полимера и внутренний пористый слой (СН-пена) не связаны (не склеены) друг с другом. В пористом слое рассматривается вариант только открытых пор диаметром от 1 до 10 мкм, отношение толщины стенки пор к их диаметру полагается равным 0.1. В этом случае прочность двухслойной оболочки будет определяться прочностью тонкого слоя из компактного полимера.

**Случай D:** *двухслойная полимерная оболочка работает как комбинированная.* В этом случае для прочности оболочки воспользуемся результатами работ [6, 7]:

$$P_b = \frac{2E_1}{\sqrt{3(1-\nu_1^2)}} (\delta_{SH}^{\text{solid}})^2 + \frac{2E_2}{\sqrt{3(1-\nu_2^2)}} (\delta_{SH}^{\text{foam}})^2, \quad (7)$$

$$E_1 = E_{\text{solid}}, E_2 = E_{\text{foam}} = E_{\text{solid}} \cdot \left( \frac{\rho_{\text{foam}}}{\rho_{\text{solid}}} \right)^2 \text{ и } \nu_1 = \nu_{\text{solid}}.$$

Для внешней СН-оболочки КТМ Боднера рассматриваются различные полимерные материалы, свойства которых даны в работах [4, 5]:

– Полиимид ( $E = 3 - 15$  ГПа,  $K_{D_2} = 1.8 \cdot 10^{-14}$  моль/м·с·Па). Здесь и далее для ДТ-смеси коэффициент газопроницаемости  $K_{DT}$  оценивался по закону квадратного корня из массы [2], что дало, в случае полиимида,  $K_{DT} \sim 1.6 \cdot 10^{-14}$  моль/м·с·Па.

– GDP-полимер (Glow Discharged Polymer;  $E = 2.6$  ГПа,  $K_{D_2} = 6.5 \times 10^{-15}$  моль/м·с·Па,  $K_{DT} \sim 5.8 \cdot 10^{-15}$  моль/м·с·Па).

– Полистирол ( $E = 3.83$  ГПа,  $K_{D_2} = 6.0 \cdot 10^{-15}$  моль/м·с·Па,  $K_{DT} \sim 5.4 \times 10^{-15}$  моль/м·с·Па).

Исследования [4] показали, что механические свойства полиимидных пленок существенно определяются их составом и методом изготовления. Так, например, изотропные пленки из ароматического полиимида обладают модулем Юнга  $E = 3 - 8$  ГПа

при 300 К. Это значение может быть увеличено в 10 раз при ориентационной вытяжке пленки и достигнуть значений, характерных для неорганических стекол и металлов. Предел прочности на растяжение при 300 К для неориентированных пленок при достаточно высокой молекулярной массе составляет  $\sigma = 100 - 200$  МПа. По данным [5], полые сферические полиимидные оболочки имеют следующие характеристики при 300 К:  $E \sim 15$  ГПа, предел прочности на растяжение  $\sigma = 300$  МПа.

Таким образом, при моделировании процесса заполнения КТМ Боднера в режиме *ramp filling* нас будет интересовать вопрос, как заполнить полимерную оболочку газообразным топливом до высоких давлений без разрушения стенки оболочки, а также как свести к минимуму время, необходимое для ее заполнения с тем, чтобы минимизировать запас радиоактивного трития в системе заполнения. При этом, если не указано иначе, будем использовать два значения модуля Юнга для полиимида:  $E = 15$  ГПа (для полиимида, производимого сейчас, [5]) и  $E = 35$  ГПа (прогнозируемое значение, [4]).

*КТМ Боднера: результаты моделирования времени и скорости заполнения  $D_2$ -газом.* Время заполнения для трех различных материалов оболочки – полиимида, GDP и полистирола, показаны в табл. 2 (Случай А + Случай С, когда двухслойная оболочка работает как однослойная) и в табл. 3 (Случай А + Случай D, когда двухслойная оболочка работает как комбинированная оболочка, т. е. собственно двухслойная). Случай А описывается формулой (6а).

Полученные нами результаты показывают, что в зависимости от выбора материала оболочки и ее конструкции, время заполнения существенно меняется – от нескольких часов до нескольких дней. Имея в виду, что минимизация времени заполнения есть непреложное условие для реализации оптимальной процедуры заполнения, становится очевидным, что необходимо иметь надежные данные по прочностным свойствам как для отдельных составляющих оболочки, так для оболочки как целого.

Теперь рассмотрим вопрос о влиянии внутреннего пористого слоя на газопроницаемость оболочки как целого. Для этого запишем коэффициенты газопроницаемости в виде:

$$\text{Случай В: } k_0(r) = \begin{cases} k_1 = K, & r_1 < r \leq r_0, \\ k_2 = \Theta \cdot K, & r_2 \leq r \leq r_1, \end{cases} \quad (8)$$

где  $\Theta$  – масштабные коэффициенты, введение которых обсуждалось выше.

Результаты расчета (Случай В, формула (8)) представлены в табл. 4. Строка № 1 соответствует условиям, когда пористый слой в КТМ Боднера не влияет на процесс заполнения  $D_2$ -топливом. Две других строки (№ 2 и № 3) соответствуют процессу заполнения,

когда газопроницаемость пористого слоя  $k_2$  варьируется по отношению к газопроницаемости внешнего компактного слоя  $k_1$  в значительном диапазоне  $\Theta = 500 - 1000$ .

Т а б л и ц а 2

КТМ Боднера: время заполнения для различных материалов (Случай А + Случай С)

Случай А + Случай С	Двухслойная оболочка работает как однослойная			Топливо
Оболочка	Полиимид	GDP-полимер	Полистирол	
$r_0$ (мкм)	1952	1952	1952	Дейтерий  $P_f =$ $= 1100$ атм
$\Delta r$ (мкм)	1	1	1	
$K$ (моль/м·с·Па)	$1.78 \cdot 10^{-14}$	$6.5 \cdot 10^{-15}$	$6.0 \cdot 10^{-15}$	
Poisson's ratio, $\nu$	0.35	0.35	0.35	
$E_{\text{solid}}$ (ГПа)	15* 35**	2.6	3.83	
$\Delta P_{\text{alone}}$ (атм)	0.0485* 0.1132**	0.0084	0.0124	Молекулярная мода
$t_f$ (ч)	48.97* 20.99**	783.4 (~32.6 дня)	574.9 (~24 дня)	
<b>Примечание:</b> для полиимида * соответствует $E_{\text{solid}} = 15$ ГПа, ** – $E_{\text{solid}} = 35$ ГПа				

Т а б л и ц а 3

КТМ Боднера: время заполнения для различных материалов (Случай А + Случай D)

Случай А + Случай D	Двухслойная оболочка работает как комбинированная			Топливо
Оболочка	Полиимид	GDP-полимер	Полистирол	
$r_0$ (мкм)	1952	1952	1952	Дейтерий  $P_f =$ $= 1100$ атм
$\Delta r$ (мкм)	1	1	1	
$K$ (моль/м·с·Па)	$1.78 \cdot 10^{-14}$	$6.5 \cdot 10^{-15}$	$6.0 \cdot 10^{-15}$	
Poisson's ratio, $\nu$	0.35	0.35	0.35	
$E_{\text{solid}}$ (ГПа)	15* 35**	2.6	3.83	
$\Delta P_{\text{alone}}$ (атм)	0.3376* 0.7876**	0.0585	0.0862	Молекулярная мода
$t_f$ (ч)	7.04* 3.02**	112.5 (~4.7 дня)	82.70 (~3.5 дня)	

Полученные результаты свидетельствуют, что расчет процедуры заполнения позволяет определить время достижения заданного давления на любой промежуточной стадии. При этом разрушение оболочки исключается, так как разница между давлением снаружи и внутри КТМ не превышает заданной величины, определяемой прочностью оболочки. Выбор конкретной кривой  $dP/dt$  определяется свойствами пористого слоя, который предполагается использовать в КТМ Боднера, так как и время, и скорость заполнения будут различны для различных значений  $\Theta$ . Таким образом, успешное (неразрушающее) заполнение КТМ Боднера топливным газом требует детального знания свойств материалов, входящих в состав полимерной оболочки.

Т а б л и ц а 4

КТМ Боднера: время и скорость заполнения для различных коэффициентов  $\Theta$

Условия заполнения ( $\Delta P_{\text{combined}} = 0.3376$ атм)		$t_{200}$	$t_{400}$	$t_{600}$	$t_{800}$	$t_{1000}$	$t_{f1100}$	Скорость (атм/мин)
№ 1	$k_2 \gg k_1$	2.1	3.7	4.9	5.9	6.8	7.1	1.82–4.83
№ 2	$\Theta = 1000$	2.7	4.8	6.4	7.7	8.9	9.3	1.06–3.51
№ 3	$\Theta = 500$	3.13	5.9	7.9	9.5	10.8	11.4	0.86–2.82

**Примечание:** 1)  $t_{200}, t_{400}, t_{600}, t_{800}, t_{1000}$  и  $t_{f1100}$  – время заполнения в часах до 200, 400, 600, 800 и 1100 атм, 2) диапазон скоростей заполнения (последний столбец) соответствует началу и концу процесса заполнения.

Сделаем несколько замечаний относительно возможностей минимизации времени диффузионного заполнения СН-оболочки дейтерием:

- Повышение прочности и газопроницаемости материала оболочки.
- Повышение температуры, при которой осуществляется процесс диффузионного заполнения.
- Переход от молекулярного режима заполнения к атомарному режиму. Реализация этого подхода основана на использовании специальных катализаторов в процессе заполнения оболочки, таких как платина, палладий или их сплавы. Первые результаты, полученные в этой области, представлены в работе [8], в которой СН-оболочки с тонким (150–200 Å) внешним покрытием из Pd или сплава Pt/Pd заполнялись D<sub>2</sub>- или H<sub>2</sub>-газом.

КТМ Боднера: результаты моделирования времени и скорости заполнения DT-газом. При длительном заполнении СН-оболочек радиоактивным топливом, невозможно *a priori* полагать, что свойства материала оболочки остаются неизменными. Как

говорилось выше, в отличие от дейтерия  $D_2$ , радиоактивный тритий, входящий в состав газообразной DT-смеси, может влиять на прочностные свойства СН-оболочки, которая со временем становится менее прочной. Изменяется также и газопроницаемость стенки оболочки. Поэтому необходимо учесть в математическом описании процесса заполнения влияние радиационных дефектов, приводящих к структурным изменениям в полимерном материале. Это можно сделать, если рассматривать газопроницаемость и прочность оболочки как функции от времени заполнения.

Будем предполагать, что коэффициенты газопроницаемости  $K_i$  ( $i$  – номер оболочки) являются монотонно возрастающими функциями времени:

$$k_i = k_i^0 \cdot (1 + \gamma_i t), \quad i = 1, 2. \quad (9)$$

Величина предельно допустимой разности давлений на стенку оболочки  $\Delta P$  также будет переменной во времени величиной, вследствие уменьшения прочности оболочки. В самом простом случае можно воспользоваться экспоненциальной функцией для описания временных изменений  $\Delta P(t) = \Delta P_0 \exp(-\gamma_3 t)$ , которая, в свою очередь, может быть аппроксимирована линейной функцией:

$$\Delta P(t) = \Delta P_0(1 - \gamma_3 t), \quad (10)$$

где  $\Delta P_0$  – начальная разность давления при  $t = 0$ . Будем полагать, что коэффициенты  $\gamma_i, i = 1, 2, 3$ , малы. Тогда вполне можно поставить задачу о моделировании процесса заполнения в режиме с квазипостоянным градиентом давления (квази *ramp filling* режим) [2, 3].

Расчет процесса заполнения выполнен при следующих исходных условиях:  $E = 8$  ГПа и  $\nu = 0.35$ . Для сравнения рассматриваются два случая.

- Прочность и газопроницаемость есть постоянные параметры в процессе заполнения:

- Газопроницаемость компактного полимера составляет  $k_1 = K_{DT} \sim 1.6 \times 10^{-14}$  моль/(м·с·Па).

- Газопроницаемость пористого полимера составляет  $k_2 = \Theta \cdot K_{DT}$ ,  $\Theta = 5000$ .

- Коэффициенты  $\gamma_3 = \gamma_1 = \gamma_2 = 0$  (радиационные дефекты отсутствуют).

- Наличие радиационных дефектов приводит к изменению коэффициента газопроницаемости и механической прочности СН-оболочки:

- Коэффициенты  $\gamma_3 = 2 \cdot 10^{-6}$ ;  $\gamma_1 = 10^{-6}$ ,  $\gamma_2 = 5 \cdot 10^{-5}$ .

Т а б л и ц а 5

КТМ Боднера: заполнение ДТ в режиме *quasiatmp filling*

Условия заполнения ( $\Delta P_{\text{combined}} = 0.1777$ атм)		$t_{200}$	$t_{400}$	$t_{600}$	$t_{800}$	$t_{1000}$	$t_{f1100}$	Скорость (атм/мин)
$\gamma_3 = \gamma_1 = \gamma_2 = 0$	$k_2 \gg k_1$	4.38	7.74	10.38	12.52	14.28	15.04	0.655–2.246
$\gamma_3 = \gamma_1 = \gamma_2 = 0$	$\Theta = 5 \cdot 10^3$	4.64	8.20	11.01	13.27	15.13	15.95	0.618–2.141
$\gamma_3 \neq \gamma_1 \neq \gamma_2 \neq 0$	$\Theta = 5 \cdot 10^3$	4.67	8.30	11.19	13.57	15.57	16.46	0.616–2.063

**Примечание:** 1)  $t_{200}, t_{400}, t_{600}, t_{800}, t_{1000}$  и  $t_{f1100}$  – время заполнения в часах до 200, 400, 600, 800 и 1100 атм, 2) диапазон скоростей заполнения (последний столбец) соответствует началу и концу процесса заполнения.

Результаты расчетов показаны в табл. 5. Видно, что наличие радиационных дефектов приводит к увеличению времени заполнения (последняя строка в табл. 5), а также к изменению диапазона скоростей (последний столбец табл. 5), необходимых для реализации процесса заполнения без разрушения оболочки. Поэтому при заполнении оболочек радиоактивным топливом до высокого давления (т.е. в течение длительного времени) необходимо иметь достоверную информацию о влиянии бета-излучения трития на свойства используемых полимеров. Это позволит либо учесть возникающие изменения, либо перейти к рассмотрению других материалов в дизайне КТМ.

*Заключение.* Наиболее распространенным методом заполнения КТМ газообразным топливом является диффузионный. Задача минимизации объемов трития, а также радиационных дефектов, возникающих в стенке полимерной оболочки вследствие бета-распада трития, требует тщательного анализа процесса заполнения одно- и многослойных КТМ топливным газом. Проведенный анализ показывает, что такие параметры полимерной оболочки, как прочность и газопроницаемость, имеют первостепенное значение при оптимизации процесса заполнения. Поскольку газ при высоком давлении ( $\sim 1100$  атм) не является идеальным (это плотный газ с межмолекулярным взаимодействием), и поскольку прочность и газопроницаемость материала стенки оболочки могут варьироваться в широких пределах или быть переменными величинами (напр., вследствие накопления радиационных дефектов в полимерах), то совершенно необходимо точное знание исходной базы данных по свойствам полимеров, предлагаемых в качестве материалов для КТМ. Проведение этих исследований входит в программу ФИАН.

Результаты моделирования, полученные в работе, являются основой для детальной разработки практических рекомендаций, необходимых при создании системы заполнения (как нерадиоактивными изотопами водорода, так и ДТ-смесью, содержащей радиоактивный тритий) для КТМ различного класса, и предназначены, прежде всего, для

исследователей, занимающихся решением практических задач. Тем не менее, некоторые выводы работы могут также оказаться полезными и для специалистов в области физики и технологии лазерных термоядерных КТМ.

Данная работа проведена при финансовой поддержке Международного Агентства по Атомной Энергии в рамках контракта № 20344 “Поточная FST-линия для массового производства мишеней для ИТС”, а также в рамках Государственного контракта по организации научной деятельности и по программе Президиума РАН.

#### Л И Т Е Р А Т У Р А

- [1] S. E. Bodner, et al., Phys. Plasmas **7**, 2298 (2000).
- [2] I. V. Aleksandrova and A. A. Belolipetskiy, Laser Part. Beams **17**(4), 701 (1999).
- [3] И. В. Александрова и др., Вопросы Атомной Науки и Техники, сер. Термоядерный синтез, вып. 4, 22 (2011).
- [4] *Энциклопедия Полимеров* (М., Советская Энциклопедия 1972).
- [5] Inertial Confinement Fusion. in: “Polyimide capsules”, Lawrence Livermore National Laboratory Annual Report; (1998), pp. 40-42, <http://www.oldlitho.com/lithodowns/fusion1.pdf>.
- [6] П. Е. Товстик, *Устойчивость тонких оболочек* (М., Наука, 1995).
- [7] A. V. Mikheev, Bull. St.Petersburg Univ., Ser. 1: Mathematics. Mechanics. Astronomy. N 3, 137 (2007).
- [8] I. V. Aleksandrova, et al., J. Phys. D: Appl.Phys. **37**, 1163 (2004).

Поступила в редакцию 20 июня 2017 г.