

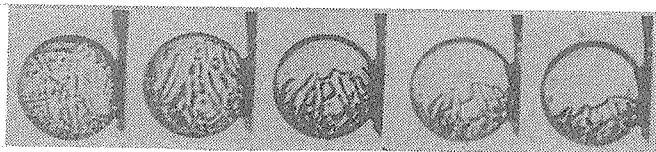
## ИССЛЕДОВАНИЕ ДИНАМИКИ ПОВЕДЕНИЯ КРИОСЛОЯ В МИШЕНЯХ ПРИ НАЛИЧИИ ГРАДИЕНТА ТЕМПЕРАТУР

Е.Р. Корешева, А.Н. Никитенко

УДК 621.378.9

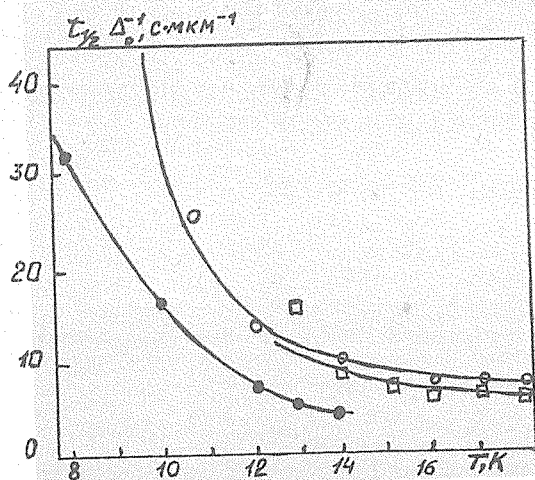
*Показано, что причиной образования разнотолщинности криослоя является наличие градиента температур на поверхности мишени. Определены условия сохранения равнотолщинного криослоя.*

Одним из важных условий эффективного сжатия мишени в камере ЛТС является высокая степень однородности по толщине составляющих ее слоев /1/. При образовании внутри термоядерной мишени криогенного слоя его параметры во многом определяются температурой и ее градиентом в окружающем мишень пространстве. В случае отклонения поверхности оболочки от условий изотермичности возникает перенос топлива в область наименьших температур /2/. Наблюдения, проведенные с водородом, дейтерием и равнопроцентной их смесью показали, что время локализации вещества в области пониженных температур тем меньше, чем выше средняя температура мишени и ее градиент. На рис. 1 показана серия фотографий, на которых зафиксировано распределение твердого  $n\text{-H}_2$  внутри стеклянной микросферы в последовательные моменты времени.



Р и с. 1. Процесс перемещения нормального водорода в область наименьших температур при  $\text{grad}T = 0,3 \text{ }^\circ\text{C}/\text{см}$ ,  $T = 12 \text{ К}$ ,  $R = 1,25 \cdot 10^{-2} \text{ см}$ ,  $\Delta_0 = 2,6 \cdot 10^{-4} \text{ см}$ .

Экспериментальные измерения температурной зависимости времени переноса вещества в одну половину сферы (рис. 2) показали, что при  $T < 10 \text{ К}$  наблюдается резкое возрастание времени локализации для слоя из  $n\text{-H}_2$ . Тот же эффект наблюдался для слоя  $n\text{-D}_2$  при  $T < 12 \text{ К}$ .



Р и с. 2. Температурная зависимость  $t_{1/2}/\Delta_0$  при  $\text{grad}T = 0,3 \text{ } ^\circ\text{C}/\text{см}$ , ● —  $\text{n-H}_2$ ,  $\Delta_0 = 2,6 \cdot 10^{-4} \text{ см}$ ,  $R = 1,2 \cdot 10^{-2} \text{ см}$ , ○ —  $\text{n-D}_2$ ,  $\Delta_0 = 1,8 \cdot 10^{-4} \text{ см}$ ,  $R = 1,25 \cdot 10^{-2} \text{ см}$ , □ —  $\text{H}_2\text{-D}_2$ ,  $\Delta_0 = 2,3 \cdot 10^{-4} \text{ см}$ ,  $R = 1,38 \cdot 10^{-2} \text{ см}$ .

На основании кинетической теории газов и в предположении, что разность температур на внутренней поверхности криослоя много меньше средней температуры мишени  $T$ , получено соотношение для времени образования 5% разнотолщинности криослоя  $t_{5\%}$ :

$$\Delta_0^{-1} \Delta T t_{5\%} = \frac{0,05 a \rho \sqrt{2\pi R_g T}}{P_0 [2,3(c - b/T^2) - 1/2T]}, \quad (1)$$

где  $a = 2$  при  $\text{Kn} < 0,01$ ,  $a = 1$  при  $\text{Kn} \geq 0,01$ ;  $\rho$  — плотность топлива в слое;  $P_0$  — давление насыщенных паров топлива при температуре  $T$ ;  $R_g$  — газовая постоянная;  $b$  и  $c$  — коэффициенты в параметрической формуле для давления насыщения паров изотопов водорода;  $\Delta_0$  — равномерная толщина криослоя.

В табл. 1 даны расчетные значения функции  $F = \Delta_0^{-1} \Delta T t_{5\%}$  в сравнении с результатами расчетов, проведенных в работе /3/.

Т а б л и ц а 1

Расчетные значения  $F$ ,  $\text{град} \cdot \text{с}/\text{см}$

$T, \text{K}$	5	8	10	12	14	16
$\text{n-H}_2$	$2,4 \cdot 10^4$	$1,7 \cdot 10^1$	$1,6 \cdot 10^0$	$1,3 \cdot 10^0$	$5,2 \cdot 10^{-1}$	$2,5 \cdot 10^{-1}$
$\text{n-D}_2$	—	—	—	$2,7 \cdot 10^0$	$8,3 \cdot 10^{-1}$	$2,2 \cdot 10^{-1}$
$\text{p-H}_2$ /3/	$4,3 \cdot 10^4$	$3,5 \cdot 10^1$	$3,8 \cdot 10^0$	$9,7 \cdot 10^{-1}$	$3,0 \cdot 10^{-1}$	$1,6 \cdot 10^{-1}$

Из таблицы видно, что время образования неравнотолщинности резко возрастает для  $n\text{-H}_2$  при  $T < 10$  К, что согласуется с экспериментальными наблюдениями (рис. 2).

Расчеты, основанные на решении стационарного уравнения теплопроводности в граничных условиях 4-го рода, позволили установить зависимость между отклонением температуры в любой точке внутренней поверхности криогенного слоя  $\Delta T$  от средней температуры мишени и экспериментально измеряемым внешним градиентом температур. При условии, что толщина криослоя  $\Delta_0$  и толщина внешней стенки мишени  $\Delta R$  много меньше ее радиуса  $R$ , имеем:

$$\frac{\Delta T}{R \operatorname{grad} T} = \frac{3}{2} \frac{R - \Delta R - \Delta_0}{\lambda'_3} \cos \Theta \left\{ \frac{R}{2\lambda_0} + \frac{R - \Delta R - \Delta_0}{\lambda'_3} + \frac{\Delta R}{\lambda_1} + \frac{\Delta_0}{\lambda_2} + \right. \\ \left. + \frac{\Delta R}{\lambda_0} \left( \frac{\lambda_1}{\lambda'_3} - 1 \right) + \frac{\Delta_0}{\lambda_0} \left( \frac{\lambda_2}{\lambda'_3} - 1 \right) \right\}^{-1}. \quad (2)$$

Здесь  $\lambda_0, \lambda_1, \lambda_2$  — соответственно коэффициенты теплопроводности среды вне мишени, материала внешней стенки мишени и криослоя;  $\lambda'_3$  — параметр, зависящий от коэффициента теплопроводности остаточного газа в полости мишени  $\lambda_3$  и от интенсивности массопереноса;  $L$  — внутренняя теплота сублимации,  $\Theta$  — полярный угол рассматриваемой точки.

Значение  $\lambda_3$  можно вычислить из соотношения:

$$\lambda'_3 = \lambda_3 + L \frac{P_0 [2,3(c - b/T^2) - 1/2T]}{a\sqrt{2\pi R_1 T}} \Delta T. \quad (3)$$

Таким образом, отношение разности температур на внутренней поверхности криослоя к разности температур снаружи мишени определяется отношением теплового сопротивления газовой полости к сумме тепловых сопротивлений составляющих мишень слоев. Чтобы снизить температурный градиент внутри мишени, можно применить один из следующих способов:

1. Увеличить теплопроводность внешнего слоя мишени, например, заменяя стеклянную оболочку на медную или покрывая мишень снаружи слоем материала с высокой теплопроводностью.

2. Использовать в конструкции мишени каскад с высоким тепловым сопротивлением (вакуум или пена). Такой способ приводит к ослаблению чувствительности криослоя к температуре внешней среды. Для обеспечения отвода тепла от центральной части мишени на стадии формирования криоген-

ного слоя предлагается заполнять нетеплопроводный промежуток газообразным дейтерием, который на конечной стадии сжатия также может участвовать в процессах термоядерного горения. При температуре ниже тройной точки  $D_2$  (18,7 К) давление его насыщенных паров настолько снижается, что теплообмен между внешней средой и криослоем практически исчезает.

Актуальной задачей ЛТС является создание специального узла доставки криомишени в фокус лазерной камеры без разрушения. Одним из источников разрушения является появление разнотолщинности криослоя сверх заданной величины. Из соотношений (1) — (3), полученных в работе, может быть рассчитано время возможного пребывания криомишени в неоднородном тепловом поле и поставлены условия на температуру стенок и допустимый температурный градиент в системе транспортировки мишени в фокус. Эти параметры являются определяющими при создании системы доставки мишени.

Авторы благодарят А.И. Исакова и Ю.А. Меркульева за поддержку работы и ценные замечания, В.М. Дороготовцева за помощь в работе, академика Ю.А. Осипьяна за полезные обсуждения, Э.А. Штейнмана за помощь в проведении экспериментов.

Поступила в редакцию 14 сентября 1984 г.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Гамалий Е. Г. и др. Труды ФИАН, 94, 29 (1977).
2. Исаков А. И., Корешева Е. Р., Меркульев Ю. А. Препринт ФИАН № 257, 1982.
3. Annual report KMS-Fusion, U-758, 1977.