

ТЕПЛОВАЯ УСТОЙЧИВОСТЬ КРИОГЕННЫХ МИШЕНЕЙ В УСЛОВИЯХ ЛАЗЕРНОГО ЭКСПЕРИМЕНТА

Е.Р. Корешева, А.И. Никитенко

УДК 621.378.9

Исследуется проблема разрушения криомишени в камере ЛТС. Проведены оценки времени жизни мишени в камере.

В работах /1, 2/ было показано, что для получения термоядерной "вспышки" на уровне энергий лазерного излучения 10^5 Дж оптимальной конструкцией является двухслойная мишень с внешней оболочкой из полиэтилена, на внутренней поверхности которой наморожен слой DT-льда. В связи с этим актуальной проблемой является определение условий введения такой мишени в фокус установки ЛТС без разрушения.

Характеристики криогенного слоя топлива в термоядерной мишени должны удовлетворять конкретным теоретическим требованиям: локальные возмущения на поверхности криослоя не должны превышать 1%, а однородность по толщине 3-5% от радиуса мишени. Для эффективного использования криомишени в ЛТС необходимо также ввести ограничение на допустимое содержание топлива в газообразной фазе.

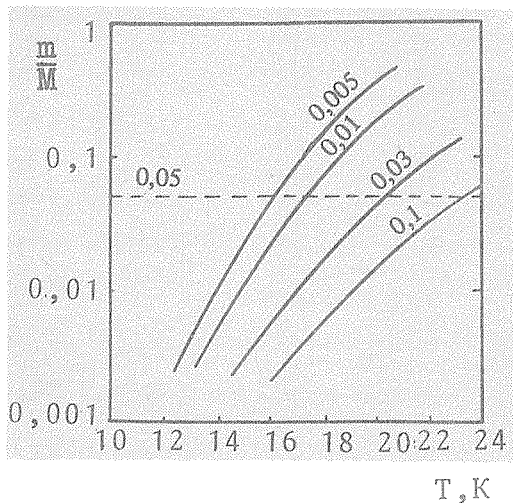
При инъекции мишени в камеру установки термоядерного синтеза в условиях симметричного притока тепла на ее поверхность разрушение может произойти по двум причинам: вследствие образования локальных неоднородностей на поверхности криослоя и из-за превышения допустимого давления газообразной фазы топлива в центре криомишени.

Как показали исследования /3/, при температурах выше $0,5T_{пл}$ ($T_{пл}$ — температура плавления топлива) в однородной криопленке с гладкой поверхностью появляются заметные локальные неоднородности в объеме и на поверхности слоя. Характерные времена этого процесса вблизи температуры $0,5T_{пл}$ составляют 15-40 с.

Относительное количество топлива, содержащегося в мишени в виде газа, при условии, что ее радиус значительно больше толщины составляющих мишень слоев, определяется выражением:

$$m/M = (R/3\Delta)\exp(-L/VT), \quad (1)$$

где m и M — масса газа и общая масса топлива; R — радиус мишени; Δ — толщина слоя топлива; B — газовая постоянная; L — внутренняя теплота сублимации топлива при температуре T . На рис. 1 показана температурная зависимость содержания газа в мишени при различных аспектных отношениях Δ/R для случая $n\text{-D}_2$.



Р и с. 1. Относительное содержание газа в полости криомишени в зависимости от температуры мишени для случая нормального дейтерия. Цифры у кривых — величина аспектного отношения Δ/R .

В настоящее время нет общепринятых критериев, ограничивающих значение m/M , а в работе [4] этот критерий вообще не учитывался. Для любого допустимого значения $m/M = a$ температура нагрева мишени, выше которой начинается ее разрушение T_p , согласно уравнению (1) определяется выражением:

$$T_p = L/B \ln(R/3\Delta a). \quad (2)$$

Основными источниками подвода тепла к мишени при ее инжекции в камеру ЛТС являются β -распад трития, содержащегося в DT-смеси, тепловое излучение стенок камеры ($T_{ст} \approx 300$ K), а также теплообмен с остаточным газом.

Эксперименты по лазерному сжатию на современных установках обычно проводятся в вакууме при давлении в камере $10^{-5} - 10^{-6}$ торр, поэтому нагрев мишени при теплопередаче через газ чрезвычайно мал.

Для оценки верхней границы значения потока мощности, поглощенного в мишени, предполагалось, что вся энергия β -распада, усредненная по спектру ($E_{\text{ср}} = 5,2$ кэВ), переходит в тепло в пределах криослоя и падающее на мишень излучение поглощается полностью в тонком наружном слое. Результаты оценки времени нагрева τ до температуры разрушения T_p , при которой $\alpha = 0,05$, по балансу тепла для некоторых типов мишеней приведены в табл. 1. Здесь же даны значения энергии $E_{\text{п}}$, поглощенной в мишени, и значения критерия Фурье F_0 в диапазоне температур от 4,2 К до T_p . Для оценок использовались данные работы /5/.

Т а б л и ц а 1

Характеристики разрушения криомишени.

Материал стенки	Стекло			Полиэтилен /1/
R, см	10^{-1}	10^{-1}	$5 \cdot 10^{-1}$	$0,93 \cdot 10^{-1}$
M, мкг	25	70	3	25
T_p , К	18	20,6	18	18
τ , мс	67	700	34	75
$F_0 \times 10^{-4}$	13,4—0,2	140—1,6	27,2—0,5	0,4—0,1
$E_{\text{п}}$, мДж	0,4	4,3	0,05	0,4

Как видно из таблицы, критерий $F_0 \geq 1$ для всех исследованных типов мишеней и оценка времени нагрева по балансу энергии не может привести к большим погрешностям. Так как образование локальных неоднородностей при $T > 0,5T_{\text{пл}}$ происходит медленнее, чем нагрев мишени до T_p , время, указанное в таблице, можно принять за время жизни мишени в камере ЛТС.

Важным фактором разрушения криомишени является энергия фонового излучения лазера и системы усилителей при недостаточно высокой контрастности излучения, что не учитывалось в настоящих расчетах.

Тепловую устойчивость криомишени можно увеличить, если использовать специальные многокаскадные конструкции, содержащие промежутки с высоким тепловым сопротивлением между каскадами /6/. Применение таких конструкций в сочетании с внешним отражающим слоем, по-видимому, неизбежно в реакторе, где поток мощности от излучения стенок более чем в 50 раз больше, чем в экспериментальной камере ЛТС.

Итак, при оценке времени жизни мишени в вакуумной камере с теплыми стенками необходимо учитывать возможность разрушения мишени за счет роста кристаллов в ДТ-слое и за счет увеличения массы газа в центре мишени при ее нагреве. Для двухслойных криомишеней с массой топлива 3 — 70 мкг время жизни в камере с $T_{ст} = 300$ К составляет 0,034 — 0,7 с. Сравнительно большие времена жизни позволяют надеяться на возможность технической реализации введения криомишеней в фокус ЛТС без разрушения. Хотя значения критериев разрушения могут заметно измениться в зависимости от режимов сжатия и конструкции мишени, настоящая работа дает общий подход к оценке времени жизни мишени в каждом конкретном случае.

Авторы благодарят А.И. Исакова и Ю.А. Меркульева за полезные обсуждения и поддержку работы, С.М. Толоконникова за помощь в работе.
Поступила в редакцию 10 декабря 1984 г.

ЛИТЕРАТУРА

1. Афанасьев Ю.В. и др. Труды ФИАН, 134, 167 (1982).
2. Аврорин Ю.В. и др. Письма в ЖЭТФ, 32, 457 (1980).
3. Корешева Е.Р. Краткие сообщения по физике ФИАН, № 12, 35 (1984).
4. Pitts J.H. Proc. 9th Symp. Eng. Probl. Fusion Res., 1, 676 (Chicago, 1981).
5. Малков М.П. и др. Справочник по физико-техническим основам криогеники. Энергия, М., 1973.
6. Корешева Е.Р., Никитенко А.И. Краткие сообщения по физике ФИАН, № 1, 37 (1985).