

Результаты одномерных расчетов по выбору мишени с непрямым воздействием для зажигания на лазерной установке “ИСКРА-6”

Н. Г. Карлыханов, В. А. Лыков, М. С. Тимакова, М. Н. Чижков¹⁾

Всероссийский НИИ технической физики имени академика Е. И. Забабахина,
456770 Снежинск, Россия

Поступила в редакцию 17 ноября 2003 г.

Предложена конструкция мишени с непрямым воздействием для зажигания на установке “ИСКРА-6”. В одномерных расчетах получен термоядерный выход 1.7 МДж при поглощенной мишенью энергии около 30 кДж.

PACS: 52.57.Vc

В США и Франции создаются мощные лазерные установки NIF и LMJ с энергией в импульсе до 2 МДж [1, 2]. В опубликованных работах [1–3] обоснована возможность достижения на этих лазерных установках термоядерного зажигания криогенных мишеней. Для имплозии сферических мишеней с непрямым воздействием будет использоваться чернотельное рентгеновское излучение с температурой до 350 эВ, которое возникает при фокусировке лазерного излучения внутрь цилиндрической полости из золота. В России существуют планы строительства в РФЯЦ-ВНИИЭФ лазерной установки “ИСКРА-6” на основе твердотельного лазера с энергией до 300 кДж в наносекундном импульсе [4].

В РФЯЦ-ВНИИТФ была предложена конструкция сборки, состоящая из сферической оболочки из золота с восемью отверстиями для ввода лазерного излучения, восемью экранами и многослойной сферической мишени в центре [5]. Были проведены трехмерные расчеты распространения излучения внутри такой сборки, а также одномерные расчеты сжатия и горения многослойной сферической мишени. Эти расчеты и оценки указывали на возможность реализации условий для осуществления термоядерной вспышки с выходом до 10^{16} нейтронов за импульс при энергии лазера менее 1 МДж [5].

Настоящая работа явилась продолжением исследований, проводимых РФЯЦ-ВНИИТФ в области ЛТС. Предполагалось изучить возможность термоядерного воспламенения мишени с бериллиевым аблятором, подобной мишени для NIF [6], на установке “ИСКРА-6”. Мишень для NIF, предложенная Лос-Аламосской национальной лабораторией (ЛАНЛ), состоит из бериллиевого аблятора в виде сферической оболочки толщиной 0.155 мм. В бериллий добавлена медь

(атомная доля 0.9 %). На внутреннюю поверхность аблятора нанесен слой дейтерий-тритиевого льда толщиной 0.08 мм, внутренний радиус 0.87 мм. Центральная область мишени заполнена газом с равновесной плотностью 0.3 мг/см³. В работе ЛАНЛ [7] приведена зависимость температуры чернотельного излучения от времени с пиковым значением 330 эВ, необходимая для зажигания. В одномерных расчетах мишени ЛАНЛ, проведенных по программе LASNEX, выход термоядерной энергии составил 18.1 МДж при поглощенной мишенью энергии теплового излучения 214 кДж [7].

Расчеты по выбору мишени проводились по одномерной программе ЭРА [8, 9], созданной для моделирования физических процессов, происходящих в мишенях для ЛТС. Учитывался перенос энергии и импульса неравновесным излучением в многогрупповом диффузионном приближении. Использовался табулированный спектральный коэффициент поглощения, рассчитанный по модели среднего атома [10].

В качестве исходной точки для оптимизации была взята мишень ЛАНЛ, уменьшенная в два раза. Временная зависимость температуры чернотельного излучения на поверхности мишени была масштабирована путем сжатия шкалы времени в 2 раза.

Для энергии, поглощенной мишенью, можно записать следующее приближенное соотношение:

$$E_{abs} = \sigma T^4 \cdot 4\pi R^2 \cdot \Delta t,$$

где T – пиковая температура излучения, R – внешний радиус мишени, Δt – время нарастания температуры. Уменьшение радиуса R и времени Δt в 2 раза должно дать снижение поглощенной энергии в 8 раз – с энергии 214 кДж для мишени ЛАНЛ до энергии 25–30 кДж.

При масштабировании мишени ЛАНЛ нет полного подобия. Как известно [3], зажигание мишени для

¹⁾e-mail: m.n.chizhkov@vniitf.ru

	NIF	ИСКРА-6
Параметры мишеней		
Внешний радиус оболочки (мм)	1.105	0.5575
Толщина бериллиевой оболочки (мкм)	155	82.5
Толщина DT-льда (мкм)	80	40
Атомная доля Си в абляторе (%)	0.9	2
Температура Hohlraum		
Максимальная температура излучения (эВ)	330	360
Время нарастания температуры (нс)	20	10
Результаты расчетов сжатия мишени		
Поглощенная мишенью энергия (кДж)	200	31
Скорость оболочки при сжатии (км/с)	330	400
Доля испаренной массы мишени (%)	84	90
Результаты расчетов горения мишени		
Максимальная ионная температура (кэВ)	100	40
Максимальная плотность топлива (г/см ³)	490	700
Выгорание трития (%)	34	19
Выход термоядерной энергии (МДж)	24	1.7
Нейтронный выход (10 ¹⁷)	90	6
Необходимые параметры лазера		
Энергия (МДж)	1.4	0.3

NIF происходит из горячего пятна в центре с температурой $T_i \sim 10$ кэВ и $\rho R \sim 0.3$ г/см². В масштабированной мишени не достигается требуемого значения ρR в горячем пятне и мишень не зажигается.

Согласно работе [3], энергия драйвера, требуемая для зажигания, обратно пропорциональна скорости имплозии в некоторой степени $E_{las} \sim 1/V_{imp}^\alpha$. Поэтому при уменьшении лазерной энергии требуется увеличивать скорость схлопывания оболочки. Скорость имплозии пропорциональна температуре излучения на поверхности мишени: $V_{imp} \sim T^{0.9}$ [3]. Следовательно, для зажигания уменьшенной мишени требуется увеличение температуры.

Отсутствует подобие и по пробегам излучения. Масштабированная мишень требует уменьшения пробегов, что может быть достигнуто за счет увеличения содержания меди в бериллии.

В ходе расчетной оптимизации, проведенной по программе ЭРА, были определены согласованные параметры мишени (рис.1), температуры излучения (рис.2) и требуемая концентрация примеси в абляторе. Толщина бериллиевой оболочки увеличена на 6% по отношению к уменьшенной в 2 раза мишени ЛАНЛ. Пиковая температура излучения на поверхности мишени составила 360 эВ. При использовании в качестве аблятора смеси из 98% атомов бериллия и 2% атомов меди получено расчетное энерговыделение из мишени около 1.7 МДж.

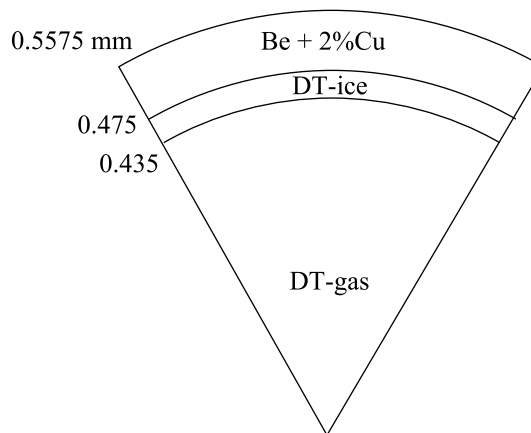


Рис.1. Схема мишени для зажигания на установке "ИСКРА-6"

Характеристики сжатия и горения мишеней для установок NIF и "Искра-6", полученные в расчетах по программе ЭРА, представлены в таблице. Рассчитанная по программе ЭРА величина термоядерной энергии для мишени ЛАНЛ совпадает со значением, полученным по программе LASNEX, с точностью 30%. Это служит подтверждением достаточной близости методик расчета термоядерных мишеней, применяемых в РФЯЦ-ВНИИТФ и ЛАНЛ.

Поглощенная масштабированной мишенью энергия составила 31 кДж. При использовании конструкции сборки "Hohlraum" типа NIF [3] с эффек-

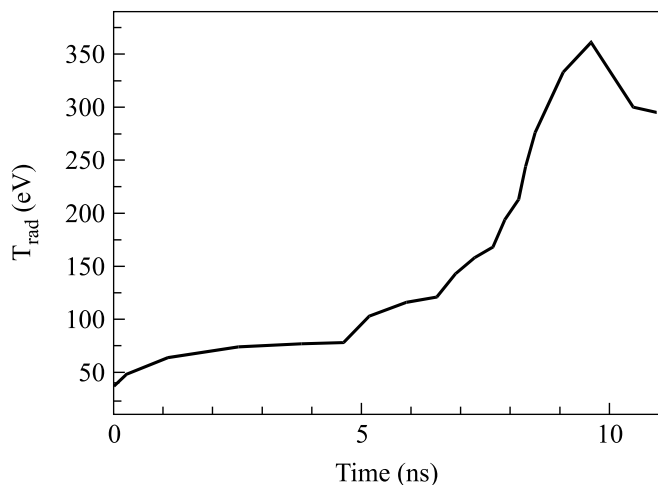


Рис.2. Зависимость температуры чернотельного излучения на поверхности мишени от времени

тивностью передачи энергии лазера мишени $\eta = E_{\text{abs}}/E_{\text{las}} = 0.12 - 0.15$ для зажигания может потребоваться 200 – 300 кДж лазерной энергии, то есть энергетика лазерной установки типа “ИСКРА-6”.

При сжатии мишени, полученной в ходе оптимизации, достигается плотность топлива, в 1.4 раза превышающая максимальную плотность при сжатии мишени ЛАНЛ.

На рис.3 приведен спектр рентгеновского излучения, выходящего из мишени ЛАНЛ и масштабирован-

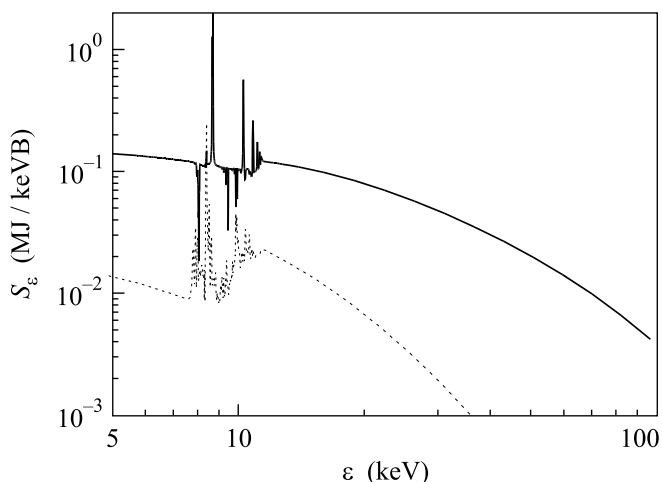


Рис.3. Спектр излучения с энергией более 5 кэВ при горении мишеней для установок NIF и “ИСКРА-6”

ной мишени. Выход энергии в виде рентгеновского излучения из мишени для NIF составил около 3 МДж, а из мишени для установки “ИСКРА-6” – 150 кДж.

Рис.4 иллюстрирует зависимость термоядерного энерговыделения мишени от спектрального коэффици-

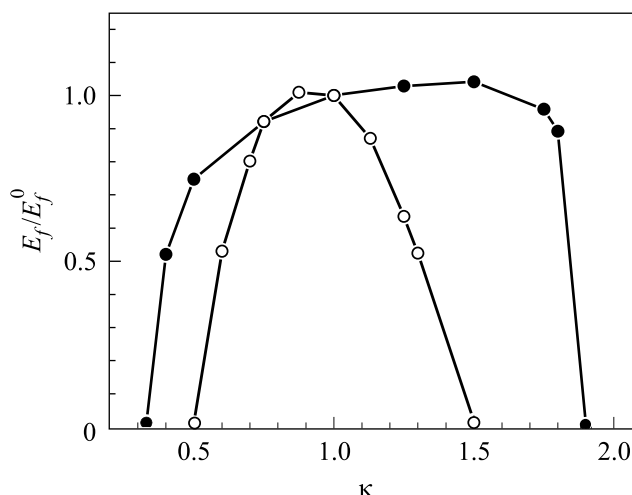


Рис.4. Отношение термоядерного энерговыделения при вариации коэффициента поглощения излучения к энерговыделению при номинальном коэффициенте поглощения в расчетах мишеней для установок NIF (черные точки) и “ИСКРА-6” (светлые точки). Спектральный коэффициент поглощения изменялся путем умножения на постоянный множитель

циента поглощения, который варьировался путем умножения на постоянный множитель. Мишень ЛАНЛ допускает отклонение в коэффициенте поглощения на 60%. Мишень для установки “ИСКРА-6” является более чувствительной к пробегам излучения и допускает отклонение в коэффициенте поглощения на 30%.

Помимо спектральных расчетов, по программе ЭРА были проведены “трехтемпературные” расчеты мишеней для NIF и установки “ИСКРА-6”. Результаты хорошо согласуются.

В данной работе мы не затрагивали таких важнейших для зажигания вопросов, как влияние перемешивания, асимметрии излучения на поверхности, шероховатости границ оболочек. Это является направлением для дальнейших исследований.

1. E. M. Campbell and J. W. Hogan, in *Inertial Fusion Sciences and Application-99*, Eds. Christian Labaune, William J. Hogan, Kazuo A. Tanaka, Elsevier, 2000, p. 9.
2. M. L. Andre, in *Inertial Fusion Sciences and Application-99*, Eds. Christian Labaune, William J. Hogan, Kazuo A. Tanaka, Elsevier, 2000, p. 32.
3. J. Lindl, *Phys. of Plasma* **2**, 3933 (1995).
4. G. A. Kirillov, G. G. Kochemasov, A. V. Bessarab et al., *Laser and Particle Beams* **18**, 219 (2000).
5. E. N. Avrorin, V. A. Lykov, V.É. Chernyakov et al., *Laser and Particle Beams* **15**, 145 (1997).

6. D. C. Wilson and W. J. Krauser, *Laser Interaction with Matter Proc. of 23-rd European Conf.*, IOP Conference Series Number 140, IOP Publishing, Bristol and Philadelphia, 1995, p. 459.
7. P. A. Bradley and D. C. Wilson, *Physics of Plasma* **6**, 4293 (1999).
8. Н. А. Барышева, А. И. Зуев, Н. Г. Карлыханов и др., *Ж. вычислительной математики и математической физики* **22**, 401 (1982).
9. А. И. Зуев, *Ж. вычислительной математики и математической физики* **32**, 82 (1992).
10. А. Ф. Никифоров, В. Г. Новиков, В. Б. Уваров, *Квантово-статистические модели высокотемпературной плазмы*, М.: Физматлит, 2000.