

РАСЧЕТНО-ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ РАБОТЫ ТЕРМОЯДЕРНОЙ МИШЕНИ В ЭКСПЕРИМЕНТЕ НА УСТАНОВКЕ NIF

A CALCULATIONAL-THEORETICAL STUDY OF THE THERMONUCLEAR TARGET BEHAVIOR IN A NIF EXPERIMENT

К. А. Волкова, А. С. Гнутов, С. А. Донцов, А. С. Ульянов
K. A. Volkova, A. S. Gnutow, S. A. Dontsov, A. S. Ulyanov

ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», г. Саров, Нижегородская область, пр. Мира, 37, 607188, Россия
Russian Federal Nuclear Center – All-Russian Scientific Research Institute of Experimental Physics

В настоящей работе были проведены двумерные расчеты работы термоядерной мишени установки NIF в полной постановке. Получены характеристики поля рентгеновского излучения в мишени, динамика сжатия термоядерной капсулы, количество термоядерных реакций. Выполнено сравнение полученных результатов с экспериментальными данными из открытых источников.

Two-dimensional integrated hohlraum simulation of National Ignition Facility thermonuclear target was carried out. Target X-ray field distribution, thermonuclear capsule implosion dynamic, neutron yield were obtained. Obtained data were compared with experimental results from open sources.

В 2011 году принято решение о строительстве перспективной лазерной установки мегаджоульного класса на второй гармонике неодимового лазерного излучения (1) Опыты, проводимые на строящейся экспериментальной установке, будут иметь большое значение для валидации и совершенствования расчетных комплексов РФЯЦ-ВНИИЭФ. В свою очередь, качественное расчетно-теоретическое сопровождение проводимых экспериментов будет иметь ключевое значение для достижения одной из основных целей установки – понимания физики термоядерного зажигания.

До ввода в эксплуатацию перспективной лазерной установки для модернизации существующих в РФЯЦ-ВНИИЭФ расчетных комплексов представляется целесообразным использование экспериментальных данных, полученных в ходе работы схожей по характеристикам лазерной установки National Ignition Facility (NIF), построенной в Ливерморской национальной лаборатории (США) в 2009 году.

NIF обладает 192 лазерными лучами, объединенными в 48 кластеров по 4 луча, суммарной энергией лазерного излучения (ЛИ) до 1.9 МДж на третьей гармонике неодимового лазера (длина волны ЛИ 0,351 мкм). В открытом доступе нахо-

дится большое количество информации связанной с проводимыми на NIF экспериментами по достижению полномасштабного горения термоядерной ДТ-смеси в режиме непрямого (рентгеновского) воздействия на сферическую капсулу, содержащую ДТ-смесь. Конверсия ЛИ в равновесное рентгеновское излучение (РИ) производится при облучении золотых (или урановых) внутренних стенок цилиндрического бокса-конвертера (хольраума).

В качестве базы для расчетно-теоретического исследования в данной работе был выбран low-foot выстрел N11215 (2).

Рассматриваемая система состоит из цилиндрического бокса-конвертера внутренним радиусом 2,875 мм длинной внутренней полости 9,425 мм и капсулы, содержащей ДТ-топливо, расположенной в центре бокса. Данная конфигурация соответствует стандартному на сегодняшний день «575 хольрауму» (3). Внутренняя поверхность хольраума покрыта 50 мкм слоем золота. В качестве внешней стенки на золото нанесен слой полиэтилена СН толщиной 80 мкм. В центре торцов цилиндра имеется отверстие для ввода ЛИ диаметром 3,375 мм (2). Внутренняя полость конвертера заполнена гелием с плотностью 0,96 мг/см³. Температура мишени 19,6 К.

ДТ-капсула представляет собой сферическую оболочку-аблятор из нескольких слоев пластика СН с различным добавлением Si общей толщиной 196 мкм и внешним радиусом 1,13 мм. На внутреннюю поверхность наморожен сферический слой ДТ-льда толщиной 68 мкм плотностью 0,25 г/см³. Внутренняя полость заполнена ДТ газом плотностью 0,3 мг/см³ (2). Разрез капсулы представлен на рис. 1.

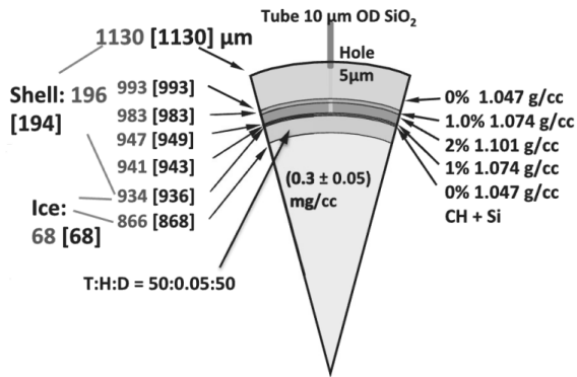


Рис. 1. Разрез термоядерной капсулы в выстреле N11215 [2]

Геометрия задачи представлена на рис. 2.

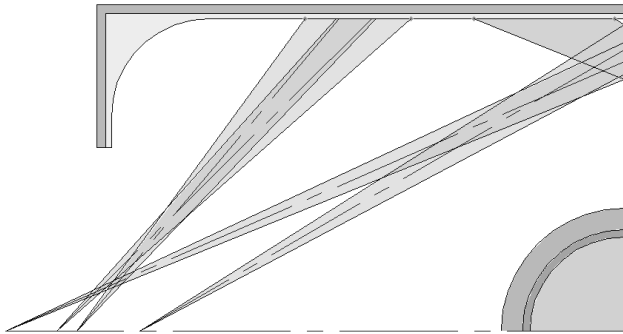


Рис. 2. Геометрия задачи

Через каждое из входных отверстий внутренняя поверхность бокса облучается четырьмя конусами ЛИ, которые входят в бокс под углами примерно 50°, 45.5°, 30° и 23.5°. Конусы ЛИ попарно образуют два кольца засветки «внешнее» и «внутреннее». Точное положение пятен засветки и фокусов лучей ЛИ для бокса предыдущей модели «544 хольраум» описано в работе 2011 года (4). Было предположено, что при переходе на «575 хольраум» фокусировка лучей не менялась, что косвенно подтверждается в статье (3).

Временная зависимость мощности лазерного излучения, подаваемого на стенку хольраума, показана в работе (5) (рис. 3).

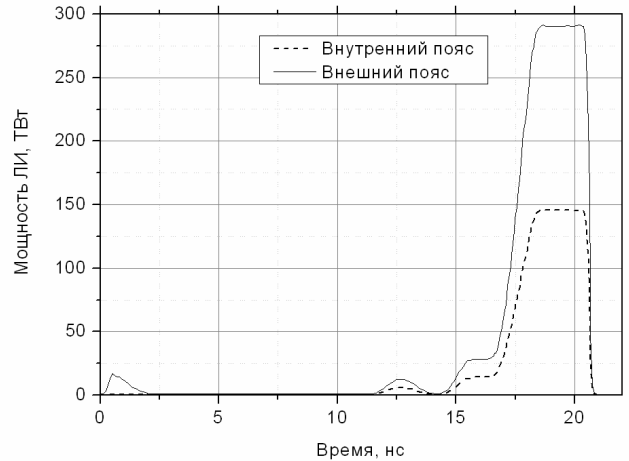


Рис. 3. Временная зависимость мощности лазерного излучения

Мощность лазерных последовательностей для внешних и внутренних конусов засветки различна и отличаются в ~2 раза. Отметим, что внутренние лучи не участвуют в первом импульсе. Полная энергия лазера 1,5 МДж, максимальная мощность 434 ТВт, причем на внутренние лучи приходится 145 ТВт, а на внешние 289 ТВт. Полная энергия внутренних лучей 0,5 МДж, внешних – 1 МДж. Длина волны лазерного излучения $\lambda = 0,351$ мкм.

В расчете не учитывались эффекты перемешивания, шероховатость капсулы, неоднородность ЛИ. Не были учтены конструктивные особенности мишени: наличие пленки входного отверстия, тента, поддерживающего капсулу.

Газодинамическое движение рассчитывалось для двухтемпературной среды, учитывались электронная и ионная теплопроводности, а также электрон-ионная релаксация. Перенос РИ рассчитывался методом Монте-Карло. При расчете учитывался только обратно-тормозной механизм поглощения ЛИ.

В качестве иллюстрации к поведенному расчету на рис. 4 распределение температуры рентгеновского излучения внутри бокса-конвертера.

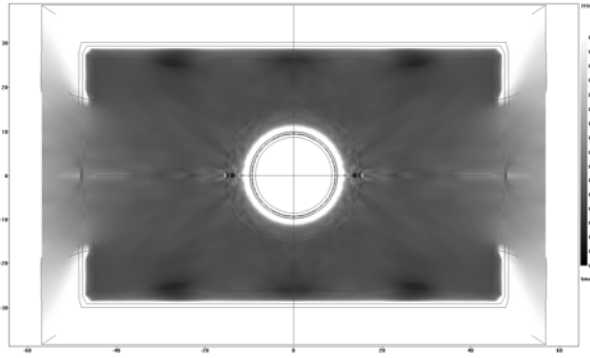


Рис. 4. Распределение температуры рентгеновского излучения внутри бокса-конвертора на момент времени 2,8 нс

На рис. 5 приводится сравнение временной зависимости температуры излучения в боксе-конвертере в обоих расчетах, в сравнении с экспериментальным значением, восстановленным по показаниям спектрометра Dante (6) на NIF.

Диагностика Dante на установке NIF измеряет поток и спектр выходящего из мишени излучения, поэтому для корректного сравнения с экспериментальными данными были использованы расчетные данные по излучению вышедшему из мишени. На рис. 13 представлено сравнение временной зависимости экспериментальной температуры излучения с температурой, полученной рассчитанной по формуле:

$$T_{rad} = 4\sqrt{\frac{J}{\sigma S}},$$

где J – интегральная мощность излучения, вышедшего через входное отверстие площадью S , σ – постоянная Стефана-Больцмана. Аналогичным образом температура излучения пересчитывается из эксперимента на NIF (7). Также температура излучения в некоторые моменты времени была вычислена методом наложения планковского спектра, на спектр выходящего излучения, полученный в расчете. При малых температурах (до 0,1 кэВ) спектр излучения совпадает с планковским, при более высоких температурах в спектре возникают линии жесткого излучения, в таком случае температура определялась совмещением максимума планковского и расчетного спектров.

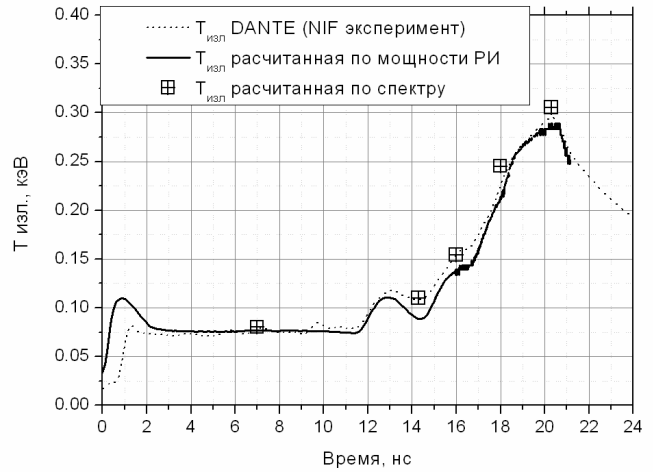


Рис. 5. Сравнение формы $T(t)$ излучения, пришедшего на датчик диагностики Dante, в проведенных расчетах с экспериментальными данными

Из приведенного рисунка видно практически полное совпадение полученной в расчетах температуры рентгеновского излучения с полученной в эксперименте. Исключением являются значения температуры во времена до 2 нс.

Полученная в расчетах завышенная температура РИ на времена до 2 нс связана с тем, что при моделировании задачи не был произведен учет тонкой пластиковой пленки, закрывающей отверстия ввода ЛИ в реальном эксперименте. Часть энергии ЛИ в опыте тратится на разлет этой пленки.

В результате расчета также была получена температура ионов в горячем пятне при сжатии термоядерной капсулы (рис. 6)

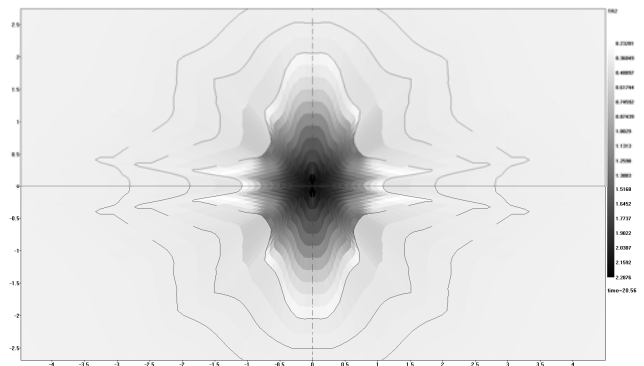


Рис. 6. Форма капсулы и распределение температуры ионов на момент максимального сжатия (и максимальной скорости нейтронного выхода) в расчете

В таблице приведены основные характеристики работы термоядерной мишени.

Основные характеристики работы мишени

	Температура ионов, кэВ	Скорость оболочки, км/с	ρR , г/см ²	Выход нейтронов
Эксперимент	3,53	300	0.94	$7,5 \times 10^{14}$
Расчет 2D	до 5,2	250–400	0.8–2.3	$2,3 \times 10^{14}$

Можно отметить удовлетворительное согласие данных эксперимента и расчета по ионной температуре, скорости схождения оболочки и параметру ρR .

Следует оговориться, что при расчете не учитывались эффекты перемешивания, шероховатость капсулы, неоднородность ЛИ. Не были учтены конструктивные особенности мишени: наличие пленки входного отверстия, тента, поддерживающего капсулу. Наличие подобных эффектов должно негативно сказываться на работе мишени. При этом даже без учета приведенных эффектов такой показатель, как нейтронный выход, приведенный в 2D расчете, оказался ниже экспериментального. В Ливерморе даже с учетом этих эффектов получают на порядок больший выход нейтронов (8) при расчете аналогичных экспериментов. Анализ существующих разногласий в полученных результатах является предметом для дальнейшего изучения.

На сегодняшний день в рамках расчетно-теоретического исследования работы термоядерной low-foot мишени NIF удалось добиться хорошего согласия расчетных и экспериментальных данных временной зависимости температуры РИ

вышедшего из мишени и расчетная методика способна удовлетворительно описывать работу термоядерной мишени.

Список литературы

1. Гаранин С. Г. Мощные лазеры и их применение в исследованиях физики высоких плотностей энергии // УФН. 2011. Т.181, №4. с.434.
2. Glenzer S. H. et al. Cryogenic thermonuclear fuel implosions on the National Ignition Facility // Phys.Plasmas. 2012. 19, 056318.
3. Callahan D. A. et al. The velocity campaign for ignition on NIF // Phys.Plasmas. 2012. 19, 056305.
4. Haan S. W. et al. Point design targets, specifications, and requirements for the 2010 ignition campaign on the National Ignition Facility // Phys.Plasmas. 2011. 18, 051001.
5. Casey D. T. et al. Development of the CD Symcap platform to study gas-shell mix in implosions at the National Ignition Facility // Phys.Plasmas. 2014. 21, 092705.
6. Dewald et al. Dante soft x-ray power diagnostic for National Ignition Facility // Review of scientific instruments. 2004. 75, 3759.
7. Meezan N. B. et al. Hohlräum designs for high velocity implosions on NIF // EPJ Conf. 2013. 59, 02002.
8. Glark D. S. et al. Radiation hydrodynamics modeling of the highest compression inertial confinement fusion ignition experiment from the National Ignition Campaign // Phys.Plasmas. 2015. 22, 022703.