

ТРЕХМЕРНЫЕ АНАЛИТИЧЕСКИЕ РАСЧЕТЫ ПОЛЯ ТЕПЛОВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ВНУТРИ СФЕРИЧЕСКОГО БОКСА С КРУГОВЫМИ КОНВЕРТОРАМИ, НАГРЕВАЕМЫМИ СНАРУЖИ ЛАЗЕРНЫМИ ПУЧКАМИ МЕГАДЖОУЛЬНОЙ УСТАНОВКИ

И. А. Химич, В. А. Лыков, Г. Н. Рыкованов

ФГУП «РФЯЦ – ВНИИТФ им. академ. Е. И. Забабахина», Снежинск, Россия

В работе [1] опубликованы результаты 3D-моделирования конверсии лазерного излучения в рентгеновское в сферическом боксе, предназначенное для сжатия мишени непрямого облучения. Эти расчеты были выполнены для проектных параметров Российской мегаджоульной лазерной установки в предположении, что 48 лазерных пучков будут вводить внутрь сферического бокса через 6 отверстий при сохранении полной симметрии куба [1]. При моделировании работы данной конструкции были обнаружены серьезные проблемы, связанные с возникновением нежелательного поглощения лазерного излучения плазмой вблизи отверстий в стенках бокса [1]. Трудности в обеспечении условий термоядерного зажигания мишеней как прямого [2], так и непрямого облучения [1] для проектных параметров Российской мегаджоульной лазерной установки стимулирует поиск альтернативных путей достижения этой цели.

В докладе представлены результаты аналитических расчетов поля теплового рентгеновского излучения внутри сферического бокса с круговыми конверторами, нагреваемыми снаружи лазерными пучками мегаджоульной установки. Конверторы, симметрично врезанные в стенки бокса, представляют собой диски из фольги или малоплотного материала (пены) с высоким значением атомного номера Z , которые полупрозрачны для собственного теплового излучения. В центре системы помещается сферическая мишень, которая должна облучаться достаточно однородно рентгеновским излучением с внутренних поверхностей конверторов и стенок бокса. Основное преимущество новой конструкции бокса с конверторами – это отсутствие проблем, связанных с запуском лазерного излучения внутрь бокса через отверстия. По существу, обсуждается новый вариант схемы прямого-непрямого облучения мишеней ИТС. Отметим, что сам термин «direct-indirect» впервые введен в работе [3], где предложено сферическую мишень окружать тонкой золотой оболочкой, а между ними оставлять вакуумный зазор. Оболочка должна была облучаться снаружи достаточно однородно лазерным излучением с интенсивностью $\sim 2 \cdot 10^{15}$ Вт/см² и длиной волны $\lambda = 0,35$ мкм. Расчеты и эксперименты указывают, что эффективность преобразования энергии лазерного излучения в односторонний поток теплового излучения с тыльной стороны конвертора может достигать $\nu_- \approx 30\text{--}40\%$ [3]. Отметим, что в работе [4] в качестве конвертора-поглотителя предложено использовать не тонкие фольги, а малоплотные композиционные материалы.

При проведении аналитических расчетов поля излучения внутри бокса новой конструкции использовался метод сферических гармоник, методика применения которого для задач ИТС и для решения стационарной линейной задачи о теплообмене излучением в сферической системе описано, например, в [5]. Из закона сохранения энергии следует, что для этой задачи односторонний поток излучения, падающего на мишень, помещенной в центре сферического бокса с круговыми конверторами, которые нагреваются снаружи лазерным излучением, дается формулой:

$$q_M = \sigma T_{\text{ИЗЛ}}^4 = \frac{\nu_- P_L}{4\pi R_B} \times \frac{1}{1 - \left(1 - (1 - \alpha_M)k^2\right) [\alpha_B - S_K (\alpha_B - \alpha_K)]}, \quad (1)$$

где P_L – полная мощность лазерного излучения, σ – постоянная Стефана-Больцмана, ν_- – коэффициент конверсии лазерного излучения в рентгеновское, α_M , α_B , α_K – альбедо мишени, бокса и конвертеров, соответственно, $k = R_M/R_B$ – отношение радиуса мишени к радиусу бокса, S_K – отношение площади всех конвертеров к площади бокса.

Отметим, что второй множитель справа в формуле (1) учитывает многократное отражение излучения от внутренних стенок бокса, что значительно повышает эффективность ($\eta \equiv q_M/P_L$) облучения мишеней по сравнению со схемой прямого-непрямого облучения, предложенной в [3].

Обсуждаемые в докладе расчеты проведены в предположении, что 48 лазерных кластеров фокусируются на внешней поверхности 6-и (по 8 кластеров) или 12-и (по 4 кластера) круговых конвертеров, размещенных в стенках сферического бокса. Обе конфигурации фокусировки лазерных пучков реализуемы при размещении 48-и объективов на мишенной камере Российской мегаджоульной лазерной установки.

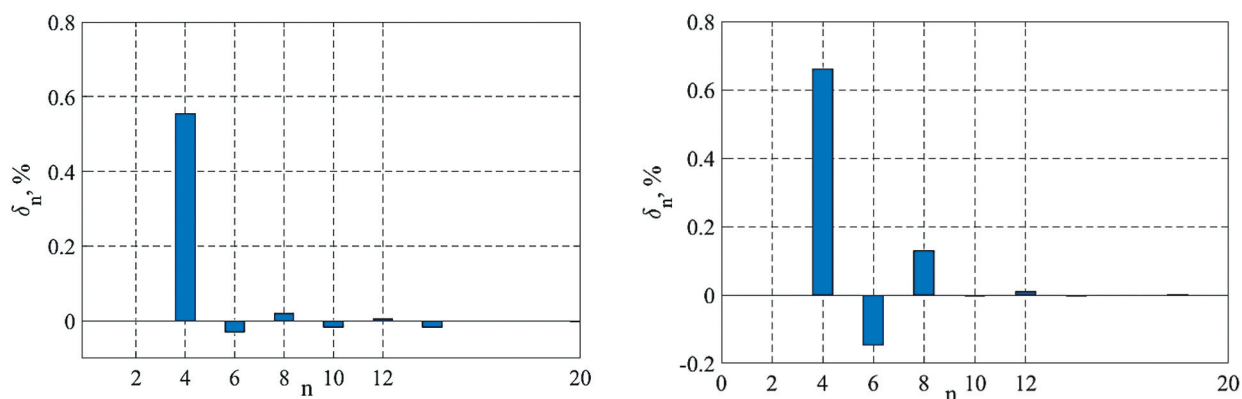


Рис. 1. Гармонический состав асимметрии излучения на мишени:

для $N_K = 6$ и $k = 1/4$ (слева), для $N_K = 12$ и $k = 1/3$ (справа); другие параметры для обеих конфигураций одинаковые: $S_K = 16\%$; $\alpha_M = 0,25$; $\alpha_B = 0,85$; $\alpha_K = 0,7$

Расчеты поля излучения внутри бокса и на поверхности мишени выполнены при постоянных значениях параметров $\alpha_B = 0,85$, $\alpha_M = 0,25$, а число конвертеров (N_K) и описанные выше параметры k , S_K и α_K варьировались. Рисунок 1 иллюстрирует высокую симметрию облучения мишени в двух вариантах проведенных расчетов. Эффективность облучения мишени в этих расчетах составляет: $\eta \approx 10\%$ при $k = 1/4$ и $\eta \approx 15\%$ при $k = 1/3$ для эффективности конвертеров $v_- \approx 35\%$.

Поскольку для предложенной конструкции эффективность v_- конверсии лазерного излучения во входящий в сферический бокс поток рентгеновского излучения в ~ 2 раза ниже, чем в классической схеме цилиндрического бокс-конвертора с двумя отверстиями, то и достижимая в боксе температура излучения $T_{ИЗЛ}$ будет на величину $\sim 15\%$ ниже. Так при мощности лазерного излучения $P_L = 450$ ТВт и рассмотренных параметрах задачи в боксе может быть достигнута величина $T_{ИЗЛ} \approx 0,26-0,28$ кэВ, что подтверждается расчетами, проведенными по двумерной программе радиационной газовой динамики [6]. По-видимому, предложенная конструкция бокса с круговыми конверторами наиболее пригодна для изучения физики сжатия двухкаскадных мишеней, которые для своей работы требуют такие значения температур излучения [7].

Литература

1. **Бондаренко, С. В.** Результаты трехмерных расчетов конверсии лазерного излучения в рентгеновское в сферическом боксе для условий мегаджоульной лазерной установки [Текст] / С. В. Бондаренко, Е. И. Митрофанов, Л. Ф. Потапкина, О. О. Шаров // ВАНТ. Сер. «Мат. мод. физ. Процессов». – 2020. – Вып. 3. – С. 11–22.
2. **Бакуркина, Е. С.** Расчеты мишеней прямого облучения для мегаджоульных установок с излучением во 2-ой и 3-ей гармониках Nd-лазера [Текст] / Е. С. Бакуркина, Н. Г. Карлыханов, В. А. Лыков и др. // Ядерная физика и инжиниринг. – 2019. – Т. 10, № 3. – С. 271–284.
3. **Eliezer, S.** Direct-indirect drive, a new possibility for laser induced fusion [Text] / S. Eliezer, J. J. Honrubia and G. Velarde // Phys. Lett. A. – 1992. – Vol. 166. – 249–252.
4. **Гуськов, С. Ю.** Малоплотный поглотитель-конвертор в лазерных термоядерных мишенях прямого облучения [Текст] / С. Ю. Гуськов, Ю. А. Меркульев // Квантовая электроника. – 2001. – Т. 31, № 4. – С. 311–317.

5. **Шибаршов, Л. И.** Физика мишеней инерциального термоядерного синтеза [Текст]. – Снежинск : Изд-во РФЯЦ – ВНИИТФ. – 2014.
 6. **Чубарешко, И. С.** Результаты численного моделирования переноса рентгеновского излучения в сферическом боксе-конверторе по программе ТИГР [Текст] / И. С. Чубарешко, А. А. Шестаков, В. А. Лыков // XVII Международная конференция «Забабахинские научные чтения» : тезисы доклада. – Снежинск : Изд-во РФЯЦ – ВНИИТФ, 2025.
 7. **Лыков, В. А.** Оптимизация двухоболочечных мишеней для проведения экспериментов вблизи порога термоядерного зажигания на мегаджоульной лазерной установке [Текст] / В. А. Лыков, Е. С. Андреев, Л. И. Ардашева и др. // Международная конференция «XVIII Харитоновские тематические научные чтения» : сборник докладов. – Саров : «РФЯЦ – ВНИИЭФ», 2017. – Т. 2. – С. 123–129.
-