

РАСЧЕТНЫЕ ОЦЕНКИ ПАРАМЕТРОВ РЕНТГЕНОВСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ В МИШЕНЯХ ТИПА «ИЛЛЮМИНАТОР» ДЛЯ ЛАЗЕРНОЙ УСТАНОВКИ МЕГАДЖОУЛЬНОГО КЛАССА

NUMERICAL ESTIMATION OF X-RAY PARAMETERS IN «ILLUMINATOR» TARGET FOR MEGAJOULE LASER FACILITY

К. А. Волкова, А. С. Гнутов, С. А. Донцов, П. Г. Кузнецов, Н. П. Плетенева
K. A. Volkova, A. S. Gnutov, S. A. Dontsov, P. G. Kuznetsov, N. P. Pleteneva

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 докладе приведены результаты расчетного моделирования конверсии лазерного излучения в рентгеновское в цилиндрической мишени «Иллюминатор» при облучении лазерным импульсом в условиях установки мегаджоульного класса. Через отверстие на одном торце цилиндра в мишень поступает лазерное излучение, а через разделительную пленку на другом торце цилиндра из мишени выходит рентгеновское излучение. Рассмотрены «Иллюминаторы» диаметром от 4 до 20 мм, облучаемые лазерным импульсом с энергией 1,2 МДж и длительностью 6 нс. По результатам двумерных расчетов получена зависимость эффективной температуры рентгеновского излучения, генерируемого в мишени, от её размеров.

The paper presents the results of numerical simulation of laser conversion into x-rays in cylindrical target “Illuminator” for laser irradiation at megajoule laser facility conditions. Laser light enters in the window at the end of the target. Through the film at another end of the target the x-rays leave the target. The “Illuminator” diameters from 4 to 20 mm are considered. The targets are irradiated by laser pulse with 1.2 MJ energy and 6 ns duration. By 2D calculations the dependence of radiation temperature from the target size is obtained.

В РФЯЦ-ВНИИЭФ создаётся мощная лазерная установка нового поколения с энергией в импульсе до нескольких мегаджоулей на второй гармонике неодимового лазера [1]. На такой установке возможно проведение экспериментов по различным направлениям физики высокой плотности энергии в веществе. Одним из направлений исследований является взаимодействие рентгеновского излучения (РИ) с плазмой. Для этого лазерное излучение (ЛИ) сначала конвертируется в рентгеновское в специальной мишени-конвертере, а затем поток рентгеновского излучения направляется на исследуемый объект. В такой постановке можно изучать перенос рентгеновского излучения по различным каналам и малоплотным средам, взаимодействие рентгеновского излучения с веществом, генерацию ударных волн под воздействием потока рентгеновского излучения и т.п.

В докладе приведены результаты расчетного моделирования конверсии лазерного излучения в рентгеновское в цилиндрической мишени, называемой «Иллюминатором», при облучении лазерным импульсом в условиях новой установки. Выбрана конструкция мишени с вводом лазерного излучения через отверстие на торце мишени. На противоположном торце цилиндра расположена разделительная пленка, через которую рентгеновское излучение выходит из мишени.

«Иллюминатор» представляет собой цилиндрический бокс-конвертер, обычно изготовленный из золота. Он является источником рентгеновского излучения в опытах по различным направлениям исследований, проводящихся в РФЯЦ-ВНИИЭФ на действующей лазерной установке «Искра-5» [2]. Принципиальная конструкция «Иллюминатора» показана на рисунке 1.

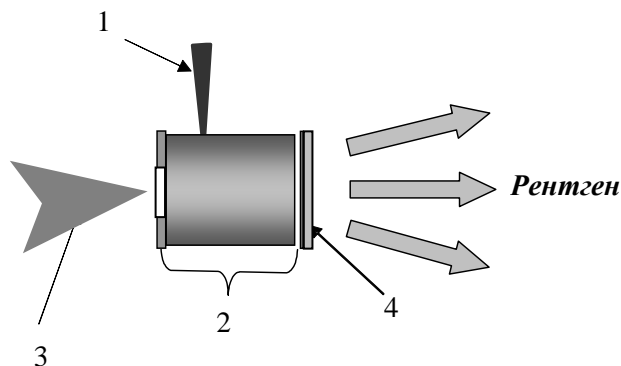


Рис. 1. Конструкция источника рентгеновского излучения «Иллюминатор»: 1 – держатель, 2 – корпус, 3 – лазерные пучки, 4 – выходное окно

При такой конструкции «Иллюминатора» можно использовать до половины всей энергии новой установки с тех лазерных каналов, которые направлены в нужную сторону.

С целью определения параметров рентгеновского излучения, достижимых в предстоящих экспериментах на новой лазерной установке, были проведены двумерные расчеты по двум программам, использующим разные методы решения кинетического уравнения переноса излучения. В методике САТУРН [3] используется разностный DS_n -метод, а в методике МИМК [4] используется метод Монте-Карло.

При этом в расчетах по обеим программам учитывался одинаковый набор процессов:

- перенос рентгеновского излучения в многогрупповом кинетическом приближении,
- перенос лазерного излучения в приближении геометрической оптики,
- газодинамическое движение плазмы в двухтемпературном приближении,
- электронная теплопроводность,
- ионная теплопроводность,
- обмен энергией между электронами, ионами, излучением.

Более подробно модели процессов, реализованные в этих программах, описаны в работе [5].

Геометрия двумерной осесимметричной мишени, заданной в расчетах, представлена на рис. 2.

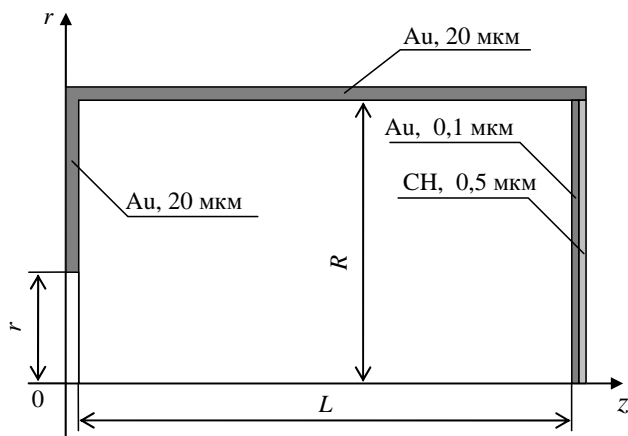


Рис. 2. Геометрия двумерных задач

Мишень представляет собой цилиндрическую трубку внутренним радиусом R и длиной L . Кожух трубки состоит из золота (Au) толщиной 20 мкм. Левый торец цилиндра закрыт шайбой из золота толщиной 20 мкм. На левом торце расположено отверстие радиусом r для ввода лазерного излучения. Правый торец цилиндра закрыт разделительной пленкой, состоящей из слоев золота толщиной 0,1 мкм и полиэтилена (СН) толщиной 0,5 мкм. Внутренняя полость мишени заполнялась веществом СН с плотностью $0,001 \text{ г/см}^3$.

Была проведена серия расчетов, отличающихся размером мишени и положением лазерных источников. Значения всех геометрических параметров расчетов приведены в таблице.

Характерные параметры расчетов

№ задачи	R , мм	L , мм	X , мм	r , мм
1	2	4	0.4	1.7
2	3	6	0.6	2
3	5	10	1	2
4	7	14	1.4	2
5	10	20	2.0	2

На рис. 3 показана схема задания источника лазерного излучения, состоящего из трёх пучков. Каждый i -ый лазерный пучок задается набором лучей, приходящих в систему с поверхности $G_i(z, r)$. Параметры лазерного источника максимально приближены к параметрам облучения цилиндрической мишени в условиях проектируемой установки. Параметры источников следующие: угол наклона оси пучка относительно нормали $\varphi_1 = 30^\circ$ (для пучка 1), $\varphi_2 = 62,5^\circ$ (для пучка 2),

$\varphi_3 = 79^\circ$ (для пучка 3), растр пучка $\Theta = 4,57^\circ$ одинаков для всех пучков. Пучок 1 фокусируется вне мишени на оси системы на расстоянии X от торца мишени (см. табл. 1). Остальные пучки фокусируются в центре отверстия ввода ЛИ. Распределение общей энергии пучка по лучам происходит пропорционально площади элемента поверхности G_i , с которого исходит данный луч.

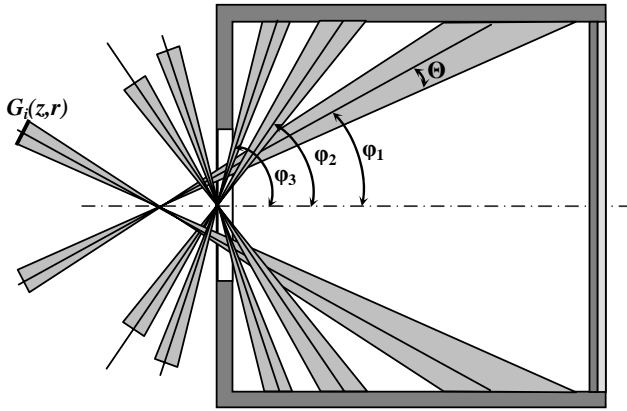


Рис. 3. Схема задания лазерного источника

Временная форма лазерного импульса задавалась в виде трапеции, представленной на рис. 4. Ширина импульса на полувысоте $\tau_{0,5} = 6$ нс. Полная лазерная энергия в трёх пучках 1200 кДж, из них по 400 кДж в каждом пучке.

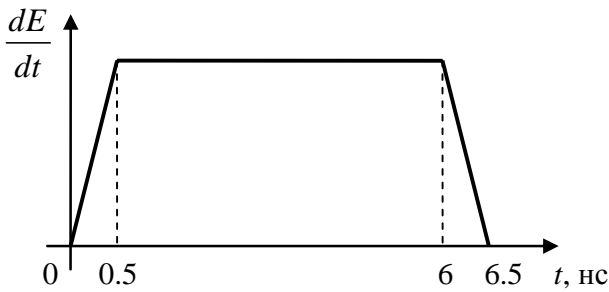
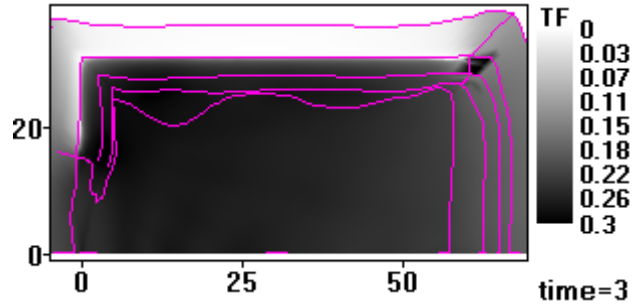


Рис. 4. Зависимость мощности лазерного источника от времени

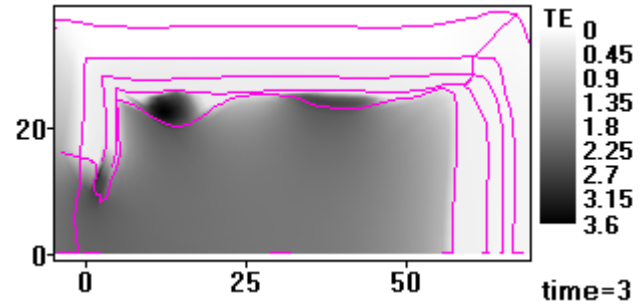
В расчетах использовались многогрупповые сечения взаимодействия рентгеновского излучения с плазмой, рассчитанные по программе ПЕРСТ-3.1 [6] с усреднением внутри групп по функции Планка. Значения средней степени ионизации также рассчитывались по данным программы ПЕРСТ.

В качестве иллюстрации протекающих процессов на рис. 5–6 приводятся пространственные

распределения в системе температур электронов и излучения на момент времени 3 нс для мишени радиусом $R = 3$ мм и $R = 5$ мм, полученные в расчетах по программе САТУРН.

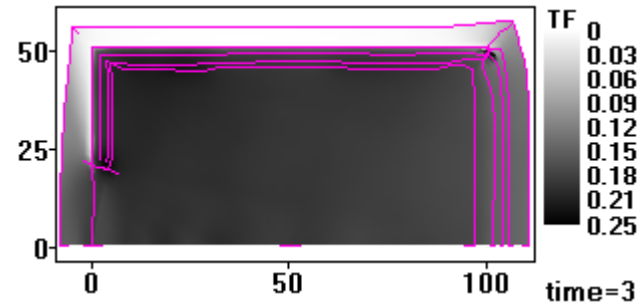


а)

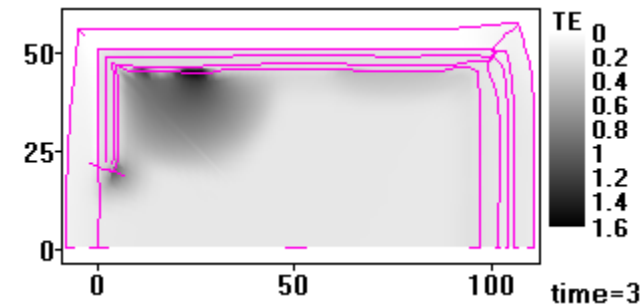


б)

Рис. 5. Пространственное распределение величин в мишени $R = 3$ мм на момент 3 нс: а) температуры излучения, б) температуры электронов



а)



б)

Рис. 6. Пространственное распределение величин в мишени $R = 5$ мм на момент 3 нс: а) температуры излучения, б) температуры электронов

На рис. 7 и 8 приведены зависимости от времени температуры рентгеновского излучения, выходящего из мишеней «Иллюминатор» через разделительную пленку, и температуры внутри бокса, полученные в расчетах по программе МММК. Наблюдается быстрый рост температуры излучения и выход на постоянную величину (во все время действия лазерного источника) для всех мишеней, кроме $R = 2$ мм, в которой произошло перекрытие разлетающейся плазмой внутренней полости, вследствие чего падает температура рентгеновского излучения на выходе и растет в центре. Таким образом, конвертер лазерного излучения в рентгеновское типа «Иллюминатор» может быть стабильным источником рентгеновского излучения на все время действия лазерного импульса.

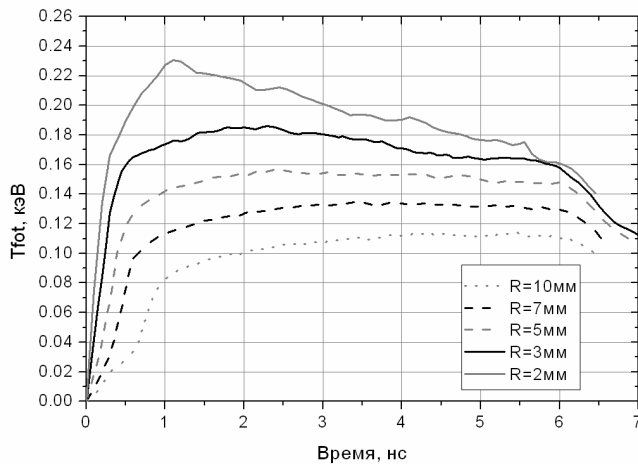


Рис. 7. Зависимость от времени температуры излучения, выходящего через правый торец мишени, для «Иллюминаторов» разных размеров

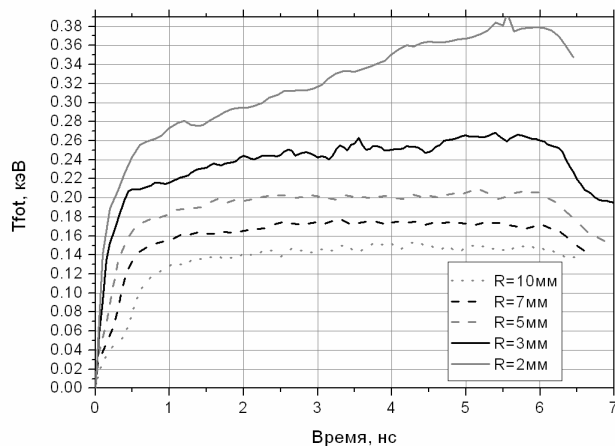


Рис. 8. Зависимость от времени температуры излучения в центре мишени для «Иллюминаторов» разных размеров

Расчетный спектр рентгеновского излучения, выходящего из мишеней через внешнюю границу, приведен на рис. 9.

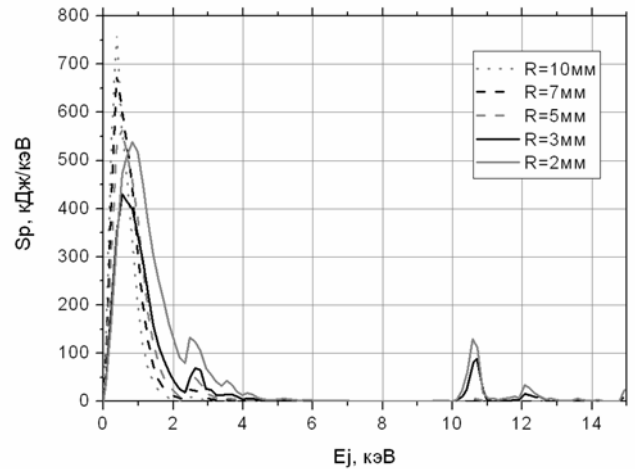


Рис. 9. Интегральный спектр рентгеновского излучения, выходящего из мишени на момент времени $t = 6$ нс

Спектры излучения, как видно на рис. 9, близки к планковскому, с некоторыми особенностями в районе 2,5–3 кэВ (M-полоса золота) и >10 кэВ (L-полоса золота). Причем относительная интенсивность жестких квантов возрастает с уменьшением размеров «Иллюминатора».

Эффективность конверсии лазерной энергии в энергию рентгеновского излучения для рассмотренных мишеней в целом составляет около 40%.

Заметим, что использование в расчетах приближения локального термодинамического равновесия (ЛТР) приводит к определенным погрешностям при описании жесткой части спектрального распределения (выше 2 кэВ), которое генерируется в лазерной плазме, где условия ЛТР могут нарушаться. Но за счет многократного поглощения и переизлучения стенками мишени поток РИ в мягкой части спектра (до 2 кэВ) близок к планковскому и описывается с достаточной точностью.

На рис. 10 приведена диаграмма максимальных температур рентгеновского излучения, достижимых в «Иллюминаторах» различных размеров, полученных в расчетах по различным программам. Видно, что в мишенях одинакового размера обе программы дают практически одинаковые максимумы температуры излучения как внутри мишени, так и на выходе из неё.

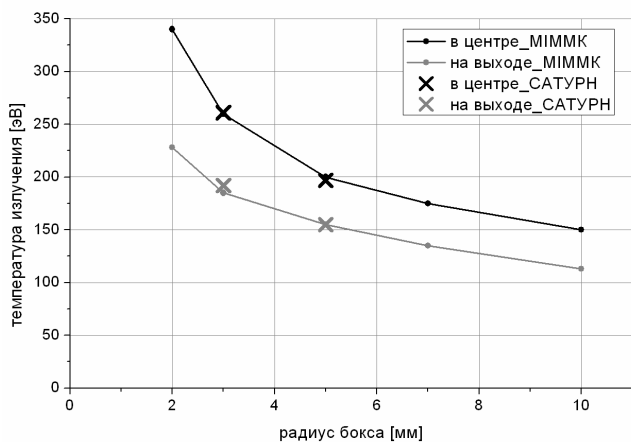


Рис. 10. Зависимость достижимых температур излучения в «Иллюминаторе» от его размеров по результатам расчетов по программам САТУРН и МИММК

Температура излучения на выходе из «Иллюминатора» является нижней оценкой температуры генерируемого РИ. В действительности стоит ожидать для «Иллюминатора» конкретного размера некоторой промежуточной температуры, зависящей от рентгеновской прозрачности пристыкованного к «Иллюминатору» объекта. Поэтому на расчетной диаграмме отмечены значения температуры излучения в этих двух точках. Необходимо также отметить, что температуры РИ в боксе радиусом 2 мм приведены графике в качестве некоей асимптотики, показывающей тренд зависимости температуры РИ при уменьшении размеров мишени. Дело в том, что реализованная в программах модель поглощения лазерного излучения учитывает лишь обратнотормозной механизм, который является основным механизмом поглощения ЛИ при относительно невысоких интенсивностях падающего ЛИ. Более того, при значении параметра $I \cdot \lambda^2 > 2 \cdot 10^{14}$ (I – интенсивность ЛИ в Вт/см², λ – длина волны ЛИ в мкм) существенная часть энергии ЛИ уходит на образование «горячих» электронов, что снижает температуру генерируемого РИ. Для мишени радиусом менее 3 мм параметр $I \cdot \lambda^2$ существенно превышает $2 \cdot 10^{14}$, что означает, что использованная в расчете модель поглощения ЛИ, вообще говоря, неприменима, а полученные результаты завышены (для рассмотренной мишени радиусом 2 мм). Гипотетически, снижение интенсивности ЛИ на стенках 2 мм бокса до допустимых уровней возможно (например, при другой системе ввода ЛИ), но обсуждение этого вопроса выходит за рамки данной работы.

В рассмотренной схеме облучения с тремя поясами засветки возникают определенные трудности с вводом пучка под углом 79° к оси мишени. Разлетающаяся плазма со стенки бокса закрывает отверстие ввода, препятствуя полному вводу лазерной энергии внутрь бокса. Тем самым теряется часть энергии данного пучка, т.е. ввод лазерного пучка под углом 79° в торцевое отверстие оказывается неэффективным. Для более полного использования энергии данного пучка можно в дальнейшем рассмотреть варианты либо увеличения торцевого отверстия, либо заведения пучка через отверстия на боковой поверхности бокса.

Список литературы

1. Гаранин С. Г. Мощные лазеры и их применение в исследованиях физики высоких плотностей энергии // Успехи физических наук. 2011. Т. 181, № 4. С. 434–441.
2. Анненков В. И., Бессараб А. В., Ватулин В. В. и др. Результаты первых экспериментов с мишенями различных типов на второй гармонике лазерного излучения установки ИСКРА-5 // VIII Харитоновские чтения по проблемам физики высоких плотностей энергии. Сборник докладов. Саров, 2006 г. С. 339–346.
3. Алексеев А. В., Беляков И. М., Бочков А. И. и др. Методика САТУРН-2005. Математические модели, алгоритмы и программы решения многомерных задач переноса частиц и энергии // Вопросы атомной науки и техники. Сер. Математическое моделирование физических процессов. 2013. Вып. 4. С. 3–16.
4. Моренко Л. З., Рябикина Н. А., Кибкало А. А. Моделирование методом Монте-Карло спектрального переноса излучения в режиме неравновесного горения в комплексе МИМОЗА (программа МИММК) // Вопросы атомной науки и техники. Сер. Математическое моделирование физических процессов. 2003. Вып. 2. С. 48–51.
5. Кузнецов П. Г., Арапова Е. Ю., Ватулин В. В. и др. Моделирование по программам ФОМИМ и МИММК процессов, протекающих в лазерных мишенях // VII научно-техническая конференция «Молодежь в науке». Сб. докладов. Саров, 28–30 октября 2008 г. С. 142–147.
6. Елисеев Г. М., Жильникова Н. Н., Тихонов А. В. Программа ПЕРСТ-3.1. Некоторые результаты расчетов. III научно-техническая конференция «Молодежь в науке». Саров, 2–4 ноября 2004 г. С. 45–48.