

## РАСЧЕТНЫЕ ОЦЕНКИ ПАРАМЕТРОВ РЕНТГЕНОВСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ В МИШЕНЯХ «ИЛЛЮМИНАТОР» ДЛЯ ПЕРСПЕКТИВНОЙ ЛАЗЕРНОЙ УСТАНОВКИ С ЭНЕРГИЕЙ В ИМПУЛЬСЕ 30–60 КДЖ

### NUMERICAL ESTIMATION OF X-RAY PARAMETERS IN «ILLUMINATOR» TARGET FOR PERSPECTIVE LASER FACILITY WITH PULSE ENERGY UP TO 60 KJ

*Г. М. Елисеев, П. Г. Кузнецов, Н. П. Плетенева, А. В. Тихонов*

*G. M. Eliseev, P. G. Kuznetsov, N. P. Pleteneva, A. V. Tikhonov*

ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», г. Саров Нижегородской обл.

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 килоджоульного 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» радиусом 0,7 мм и 1 мм, облучаемые лазерным импульсом длительностью 3 нс с энергией 32 кДж и 64 кДж. По результатам двумерных расчетов получена оценка эффективной температуры рентгеновского излучения, генерируемого в мишени, в зависимости от размеров мишени и введенной лазерной энергии.

The paper presents the results of numerical simulation of laser conversion into x-rays in cylindrical target «Illuminator» for laser irradiation at kilojoule 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» radiuses 0,7 mm and 1 mm are considered. The targets are irradiated by 3 ns laser pulse duration with energy of 32 kJ and 64 kJ. By 2D calculations the dependence of radiation temperature from the target size and introduced laser energy is obtained.

На мощных лазерных установках проводятся эксперименты 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 перспективной установки,

работающей на второй гармонике неодимового лазера (длина волны  $\lambda = 0,527$  мкм). 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» [1]. Принципиальная конструкция «Иллюминатора» показана на рис. 1.

При такой конструкции «Иллюминатора» можно использовать один или два пучка ЛИ перспективной установки, которые направлены в одну сторону.

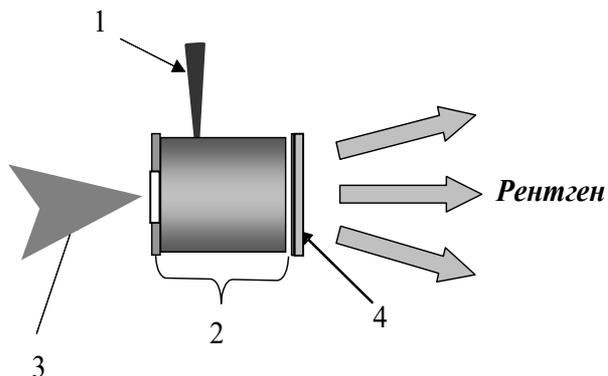


Рис. 1. Конструкция источника рентгеновского излучения «Иллюминатор». 1 – держатель, 2 – корпус, 3 – лазерные пучки, 4 – выходная пленка

С целью определения параметров рентгеновского излучения, достижимых в предстоящих экспериментах на перспективной лазерной установке, были проведены двумерные расчеты по программе САТУРН [2].

В расчетах учитывались следующие процессы:

- перенос рентгеновского излучения в многогрупповом кинетическом приближении,
- взаимодействие излучения с веществом,
- перенос лазерного излучения в приближении геометрической оптики,

- газодинамическое движение плазмы в двухтемпературном приближении,
- электронная теплопроводность,
- ионная теплопроводность,
- обмен энергией между электронами и ионами.

Более подробно модели процессов, реализованные в программе, описаны в работе [3].

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

Мишень представляет собой цилиндрическую трубку внутренним радиусом  $R$  и длиной  $L$ . Кожух трубки состоит из золота (Au) толщиной 20 мкм, покрытого полиэтиленом (СН) толщиной 100 мкм. Левый торец цилиндра закрыт шайбой из золота толщиной 20 мкм и полиэтилена толщиной 100 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 толщиной 0,5 мкм. Внутренняя полость мишени заполнялась веществом СН с плотностью  $0,001 \text{ г/см}^3$ .

Было проведено 4 расчета, отличающихся размерами мишени и энергией лазерного источника. Эти параметры указаны в табл. 1.

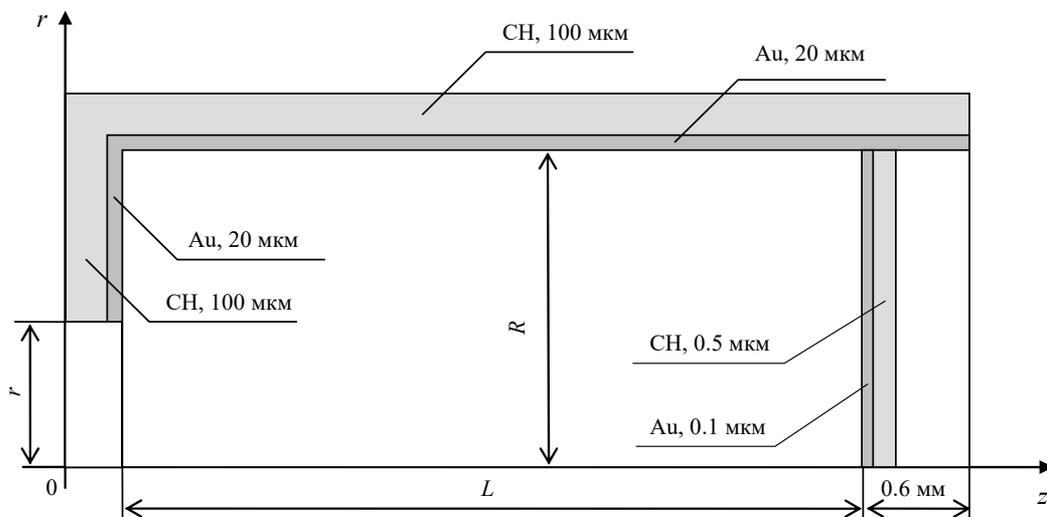


Рис. 2. Геометрия двумерных задач

Таблица 1

Характерные параметры расчетов

| № расчета | Радиус мишени $R$ [мм] | Длина мишени $L$ [мм] | Радиус отверстия $r$ [мм] | Энергия источника $E_{\text{лаз}}$ [кДж] |
|-----------|------------------------|-----------------------|---------------------------|--|
| 1         | 1                      | 3                     | 0,6                       | 32                                       |
| 2         | 1                      | 3                     | 0,6                       | 64                                       |
| 3         | 0,7                    | 2,4                   | 0,48                      | 32                                       |
| 4         | 0,7                    | 2,4                   | 0,48                      | 64                                       |

На рис. 3 показана схема задания источника лазерного излучения. Лазерный пучок задается набором лучей, приходящих в систему с поверхности  $G(z, r)$ . Параметры источника следующие: угол наклона оси пучка относительно оси цилиндра  $\varphi = 24^\circ$ , поперечный размер пучка  $m = 500$  мкм. Пучок фокусируется на оси системы в центре отверстия ввода ЛИ. Число лучей в пучке 1000. Распределение общей энергии пучка по лучам происходит пропорционально площади элемента поверхности  $G$ , с которого исходит данный луч.

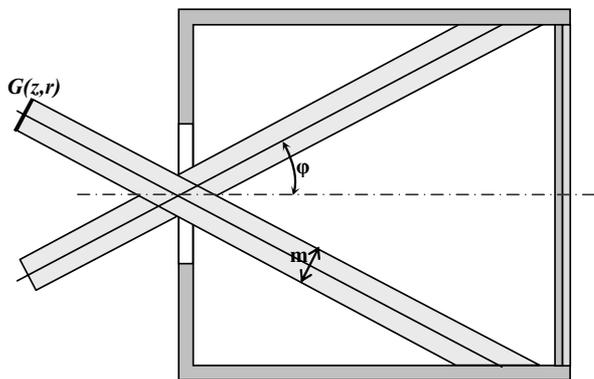


Рис. 3. Схема задания лазерного источника

Временная форма лазерного импульса задавалась в виде трапеции, представленной на рис. 4. Ширина импульса на полувысоте  $\tau_{0,5} = 3$  нс. Пол-

ная лазерная энергия в пучке задавалась равной 32 кДж и 64 кДж, что соответствует одному и двум пучкам ЛИ.

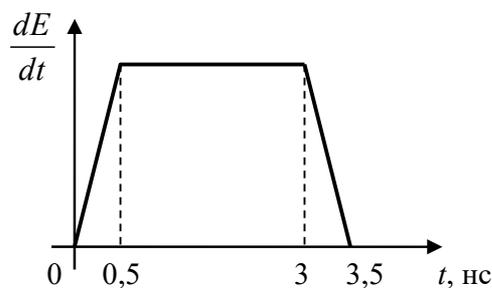
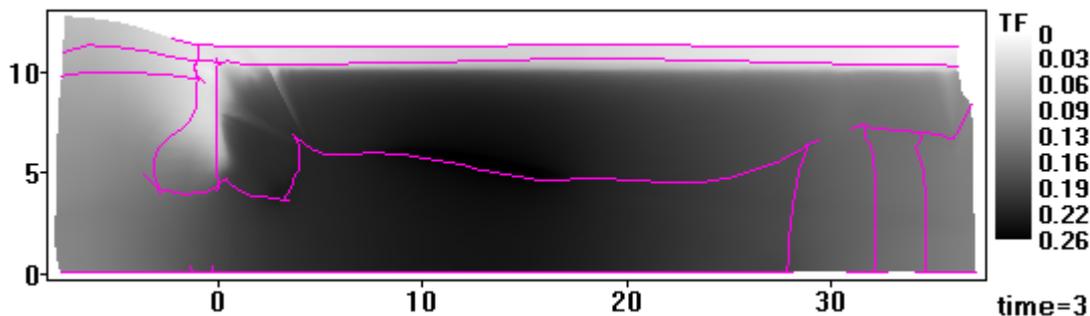


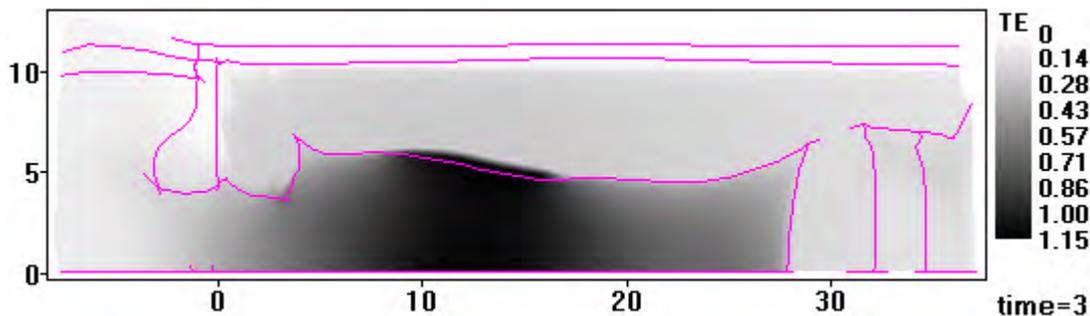
Рис. 4. Зависимость мощности лазерного источника от времени

В расчетах использовались 25-групповые сечения взаимодействия рентгеновского излучения с плазмой, рассчитанные по программе ПЕРСТ-3.1 [4] в интервале от 0 до 15 кэВ 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 мишеней радиусом  $R = 1$  мм и  $R = 0,7$  мм, полученные в расчетах с энергией источника 32 кДж.



а



б

Рис. 5. Пространственное распределение величин в задаче ( $R = 1$  мм,  $E = 32$  кДж) на момент 3 нс: а – температуры излучения, б – температуры электронов

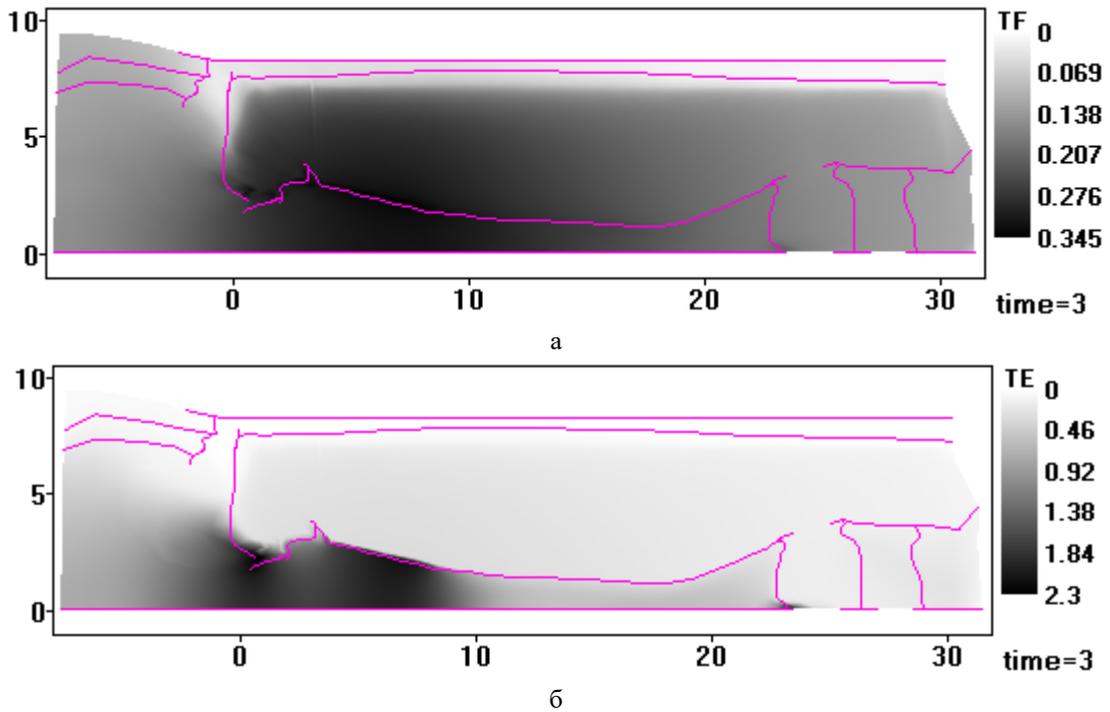


Рис. 6. Пространственное распределение величин в задаче ( $R = 0,7$  мм,  $E = 32$  кДж) на момент 3 нс: а – температуры излучения, б – температуры электронов

На рис. 7 и 8 приведены зависимости от времени температуры рентгеновского излучения в центре мишени и выходящего из «Иллюминатора» через разделительную пленку.

Для мишени радиусом  $R = 1$  мм лазерный импульс удастся ввести в мишень практически пол-

ностью как для энергии 32 кДж, так и 64 кДж. Это выражается в монотонном росте температуры излучения в центре мишени и почти постоянной температуре излучения на выходе из мишени за все время действия лазерного источника. В мишени радиусом 0,7 мм сильный разлет стенок мишени

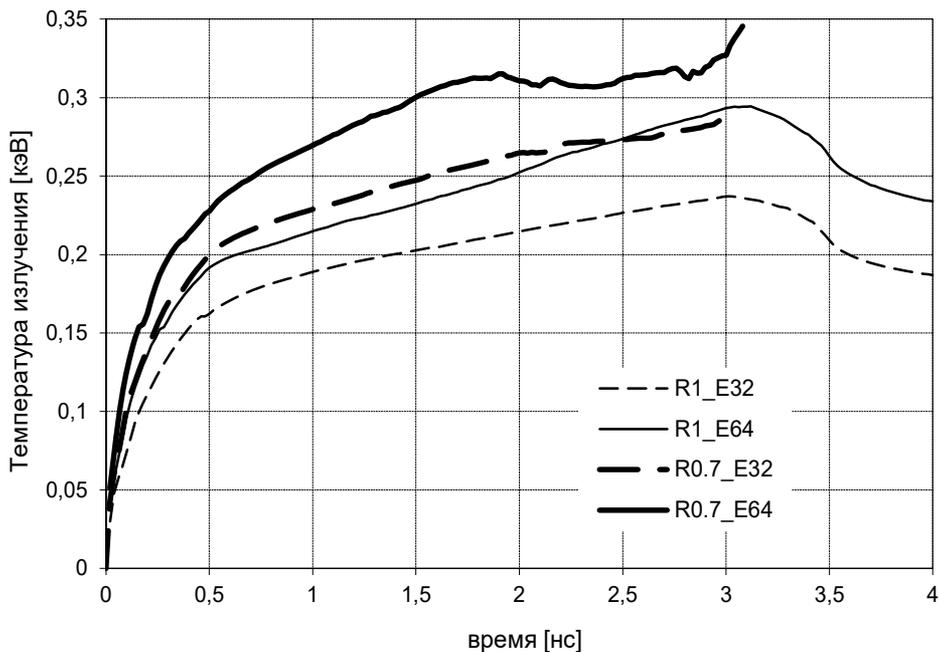


Рис. 7. Зависимость от времени температуры излучения в центре мишени для «Иллюминаторов» разных размеров

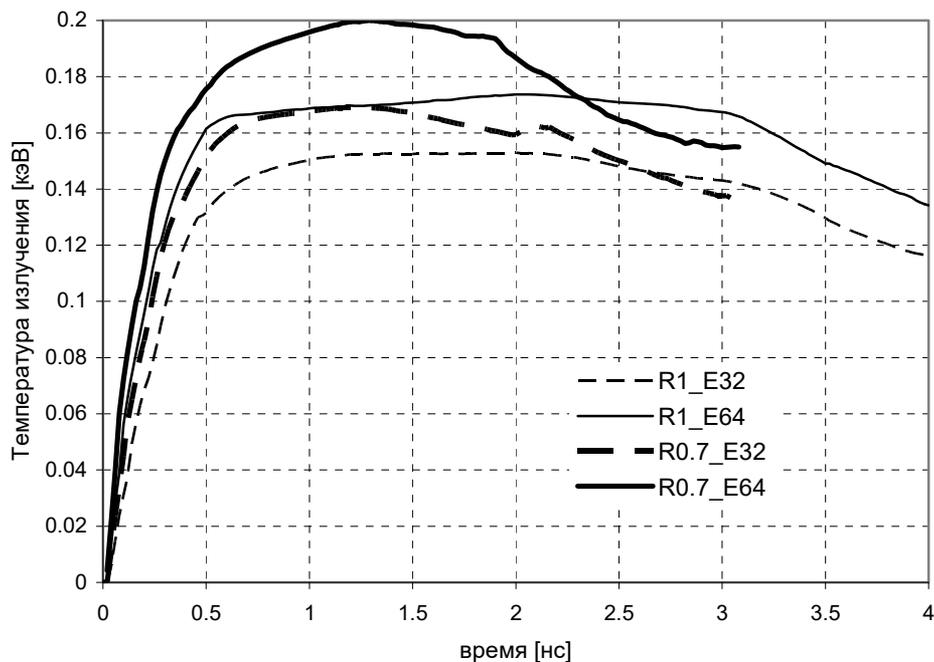


Рис. 8. Зависимость от времени температуры излучения, выходящего через правый торец мишени, для «Иллюминаторов» разных размеров

и заплывание отверстия ввода препятствуют полному вводу лазерной энергии, при этом расчеты не удалось довести до окончания действия источника. При этом температура излучения на выходе падает уже после середины импульса. Таким образом, в качестве стабильного источника рентгеновского излучения на все время действия лазерного импульса в данных условиях необходимо выбирать «Иллюминатор» радиусом не менее 1 мм.

Из графиков была получена максимальная температура излучения в характерных точках мишени, которая приведена в табл. 2.

Расчетный спектр рентгеновского излучения, выходящего из мишеней через отверстие ввода ЛИ, приведен на рис. 9.

Спектры излучения, как видно на рис. 9, близки к планковскому, но с наличием линейчатого излучения М-полосы (в районе 2,5–3 кэВ) и L-полосы (~11 кэВ) золота.

Заметим, что использование в расчетах приближения локального термодинамического равно-

весия (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.

Один из основных параметров мишени – это поток РИ, выходящего из разделительной пленки «Иллюминатора». Для мишени радиусом 1 мм он составляет ~ 20 % от вложенной лазерной энергии, а при уменьшении радиуса до 0,7 мм падает вдвое (до 10 %). Фактически, этот поток показывает ту полезную энергию, которая может поступить в следующий отсек мишени, если его пристыковать к «Иллюминатору». Такая небольшая величина выходящего потока может быть связана с протяженностью мишени (длина в 1,5 раза больше диаметра), которая обусловлена малым углом падения ЛИ (24° к оси).

Таблица 2

Максимальная температура излучения [эВ] в «Иллюминаторах»

| Характерные точки мишени           | Расчет 1<br>R1 E32 | Расчет 2<br>R1 E64 | Расчет 3<br>R0.7 E32 | Расчет 4<br>R0.7 E64 |
|------------------------------------|--------------------|--------------------|----------------------|----------------------|
| В центре мишени                    | 237                | 294                | 289                  | 345                  |
| На выходе из разделительной пленки | 153                | 173                | 169                  | 200                  |

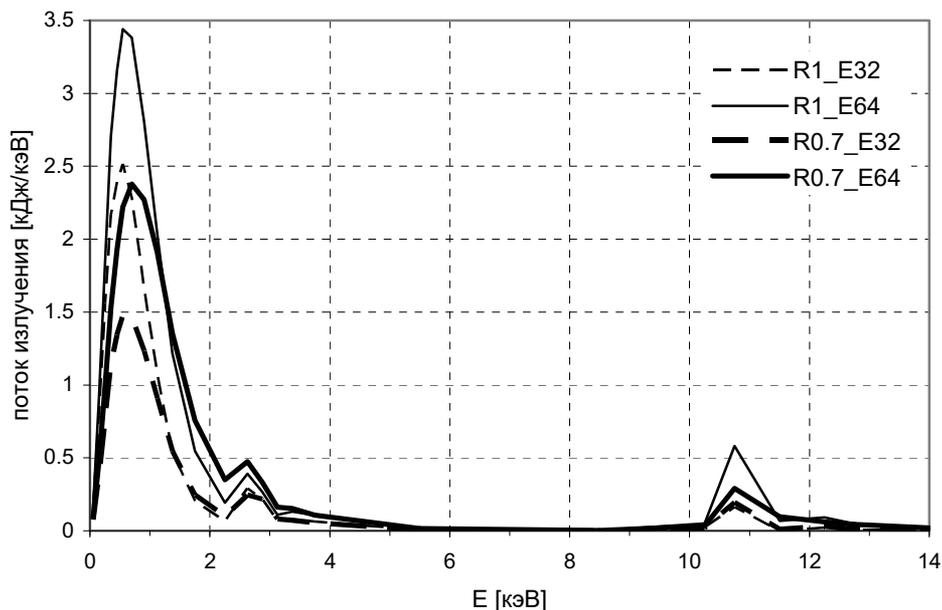


Рис. 9. Интегральный спектр рентгеновского излучения, вышедшего из отверстия мишеней к моменту времени  $t = 3$  нс

Таким образом, уменьшение размеров «Иллюминатора» в рассмотренной геометрии задачи приводит не только к сложностям с вводом лазерного излучения в течение импульса, но и к снижению потока рентгеновского излучения, необходимого для проведения экспериментов. Значит, использование мишени радиусом 0,7 мм нецелесообразно.

### Список литературы

1. 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.

2. 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.

3. 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.

4. 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.