

**РАСЧЕТ ЭКСПЕРИМЕНТА ПО КОНВЕРСИИ ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ
В РЕНТГЕНОВСКОЕ НА УСТАНОВКЕ SGIII-PROTOTYPE**
**NUMERICAL SIMULATION OF LASER TO X-RAY CONVERSION EXPERIMENT
ON THE SGIII-PROTOTYPE LASER FACILITY**

К. А. Волкова, С. А. Донцов

K. A. Volkova, S. A. Dontsov

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

Russian Federal Nuclear Center – All-Russian Scientific Research Institute of Experimental Physics

В данной работе представлены результаты численного моделирования эксперимента, проведенного на китайской лазерной установке SGIII-Prototype. В эксперименте исследовалась конверсия ЛИ в РИ внутри сферического хольраума, и были измерены характеристики выходящего РИ. Установка SGIII-Prototype обладает 8 лазерными пучками суммарной энергией ЛИ до 6,4 кДж на третьей гармонике неодимового лазера (длина волны ЛИ 0,351 мкм).

Для численного моделирования использовался расчетный комплекс, решающий двухтемпературные уравнения газовой динамики с учетом электронной и ионной теплопроводности, в котором перенос и поглощение лазерного и спектрального рентгеновского излучения моделируется методом Монте-Карло. Проведено сравнение результатов расчетов с экспериментальными данными.

This work presents the results of numerical simulation of experiment carried out at the Chinese laser facility SGIII-Prototype. At this experiment laser to X-ray conversion inside spherical hohlraum has been investigated. SGIII-Prototype laser facility has 8 laser beams with up to 6,4 kJ of total energy at the third harmonic of neodymium laser (laser wavelength 0,351 μm).

For numerical simulation two-dimensional computation program has been used. Program is capable to solve two-temperature gas dynamics equations with account for the electron and ion thermal conductivity, and includes laser and multi-group X-ray transport by the implicit Monte Carlo approximation. Numerical results have been compared with experimental data.

В экспериментах по инерциальному термоядерному синтезу (ИТС) с непрямым облучением капсула с термоядерным топливом помещается внутри бокса-конвертера. Бокс-конвертер, еще называемый «хольраум», служит для преобразования лазерного излучения (ЛИ), в мягкое рентгеновское излучение (РИ). РИ может использоваться как для сжатия термоядерной капсулы, так и для других приложений физики высоких плотностей энергии. В связи с этим изучение процессов переноса и поглощения ЛИ в хольрауме, эффективности конверсии ЛИ в РИ является неотъемлемой частью подготовки работ на лазерной установке.

В докладе приводятся результаты численного моделирования в двумерной постановке по программе МММК [1, 2] эксперимента [3] по конверсии лазерного излучения в рентгеновское, проведенного на китайской лазерной установке SGIII-

Prototype [4–6]. Установка SGIII-Prototype обладает 8 лазерными пучками, суммарной энергией лазерного излучения (ЛИ) до 6,4 кДж на третьей гармонике неодимового лазера (длина волны ЛИ 0,351 мкм).

При моделировании учитывался следующий набор процессов:

- перенос ЛИ в приближении геометрической оптики;
- обратно-тормозной механизм поглощения ЛИ;
- перенос рентгеновского излучения в многогрупповом кинетическом приближении;
- газодинамическое движение двухтемпературной плазмы;
- электронная теплопроводность;
- ионная теплопроводность;
- обмен энергии между ионами, электронами и излучением.

В эксперименте по конверсии использовался сферический бокс, обладающий двумя отверстиями ввода ЛИ. Схема эксперимента представлена на рис. 1. Бокс представляет собой золотую сферу внутренним радиусом 850 мкм. Стенки мишени состоят из золота толщиной 25 мкм. Радиус входных отверстий 400 мкм, расстояние от экваториальной плоскости до входного отверстия 750 мкм. ЛИ вводится под углом 45 градусов и фокусируется на отверстие ввода, диаметр пучков ЛИ 500 мкм. Пучок ЛИ состоит из набора лучей параллельных друг другу. В эксперименте четырьмя датчиками, расположенными под разными углами 20°, 30°, 45° и 50° относительно оси бокса, наблюдалась временная зависимость потока РИ, выходящего из мишени.

Мишень облучалась лазерным излучением длиной волны 0,35 мкм. Полная энергия ЛИ в эксперименте была 5,4 кДж.

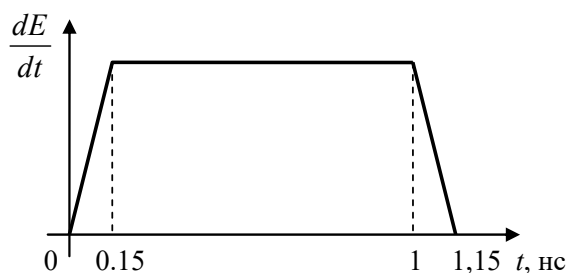


Рис. 2. Временная зависимость мощности ЛИ

В расчетах использовались спектральные 1000-групповые сечения на интервале спектральной энергии 0–20 кэВ, рассчитанные с усреднением по Планку по программе ПЕРСТ-3.1 [7].

В расчетах задавалось ограничение потока электронной теплопроводности 0,1.

На рис. 3 показаны полученные зависимости температуры излучения от времени. Серой сплошной линией показана зависимость температуры излучения внутри бокса, взятая напрямую из расчета. Черной сплошной – зависимость, полученная из пересчета температуры по вышедшему во всех направлениях излучению, по формуле: $T_{\text{изл}}(t) = (P(t) / (S_{\text{отв}} \sigma))^{1/4}$, где P – мощность выходящего излучения, $S_{\text{отв}}$ – площадь входного отверстия, σ – постоянная Стефана–Больцмана, t – время. Остальными линиями показаны зависимости, полученные

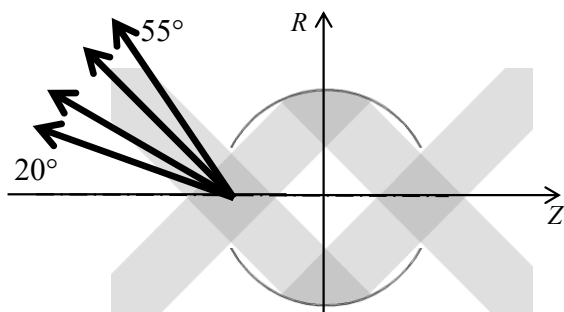


Рис. 1. Геометрия задачи, стрелками показано положение датчиков диагностики РИ

Временная форма лазерного импульса задавалась в виде трапеции, представленной на рис. 2. Ширина импульса на полувысоте $\tau_{0,5} = 1$ нс.

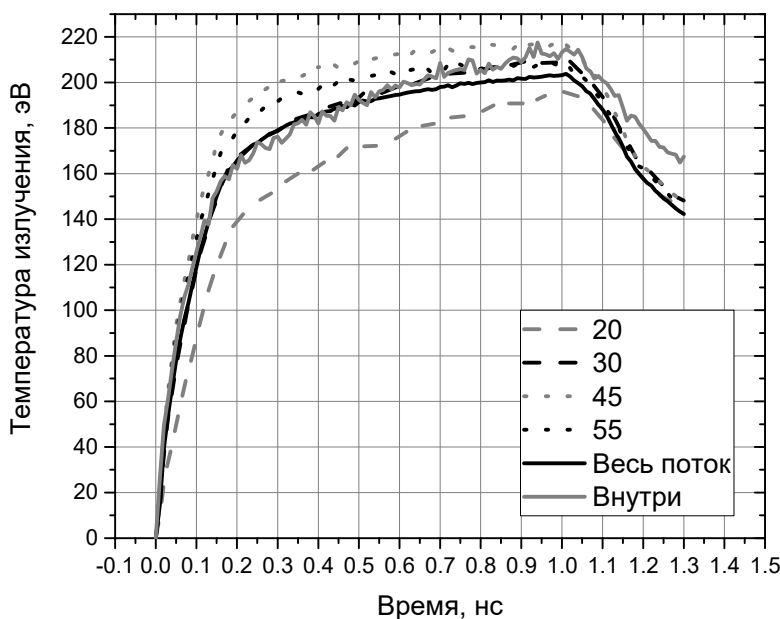


Рис. 3. Временная зависимость температуры излучения

из пересчета температуры по излучению, вышедшему внутри определенного интервала углов, брались углы обзора 20, 30, 40 и 50 градусов, интервал обзора для накопления статистики по вышедшему под определенным углом излучению брался ± 5 градусов. Температура излучения вышедшего в определенном направлении считалась по формуле:

$T_{\text{изл}}(t) = (P(t) / (S_{\text{отв}} \sigma \cos(\theta) \sin(\theta) (\varphi_2 - \varphi_1)))^{1/4}$, где P – мощность выходящего излучения, $S_{\text{отв}}$ – площадь входного отверстия, σ – постоянная Стефана-Больцмана, θ – угол обзора, φ_2, φ_1 – границы интервала обзора t – время.

На рис. 4 показаны зависимости температуры излучения от времени, аналогичные показанным на рис. 3, но без учета излучения М линии золота, то есть до 2 кэВ.

На рис. 5–8 показаны сравнения зависимостей температуры излучения от времени, экспериментальных (черная линия с серой областью) с расчетными, полученными китайскими исследователями в работе [18] (черная сплошная линия) и полученными в расчете МММК: внутри бокса (серая сплошная линия), пересчитанные из выходящего под определенным углом потока РИ (серая пунктирная линия).

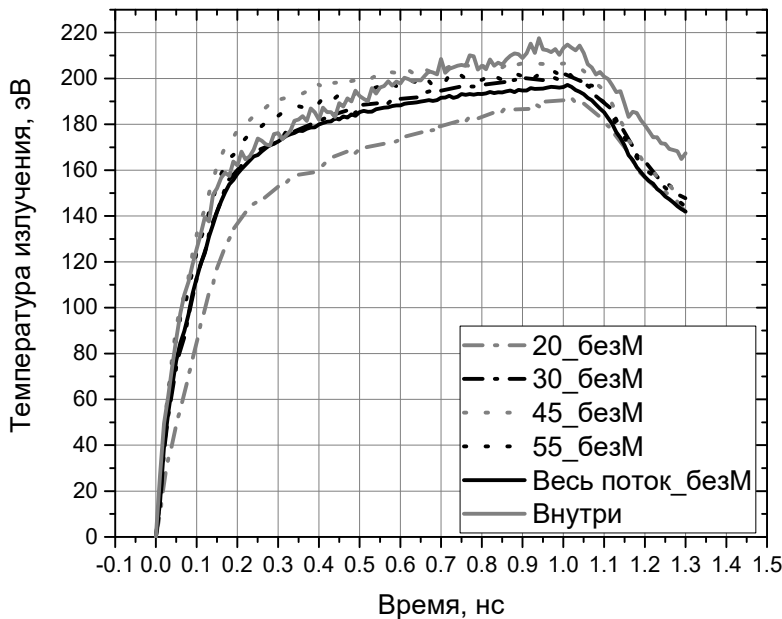


Рис. 4. Временная зависимость температуры излучения, пересчитанная без учета РИ с энергией >2 кэВ

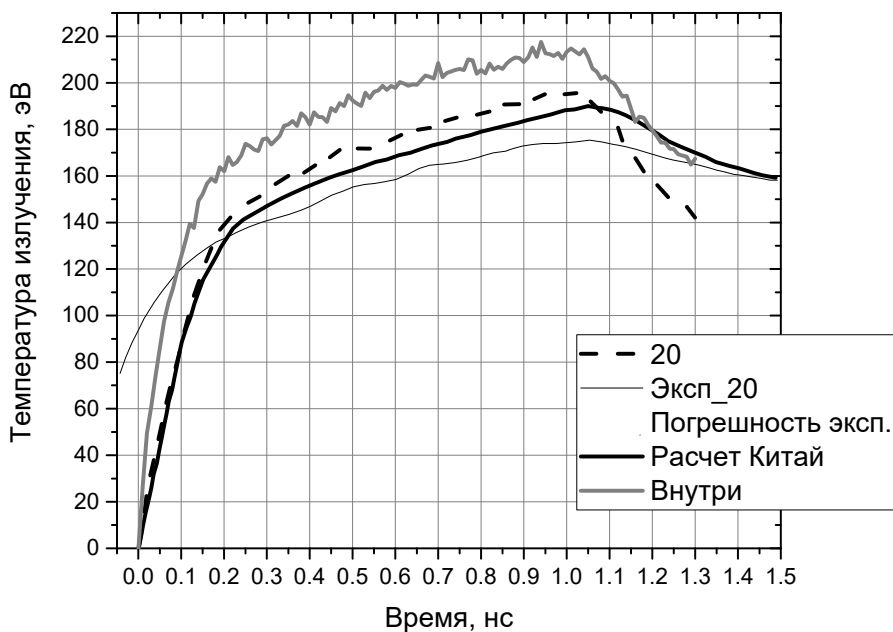


Рис. 5. Временная зависимость температуры излучения. Положение датчика 20°

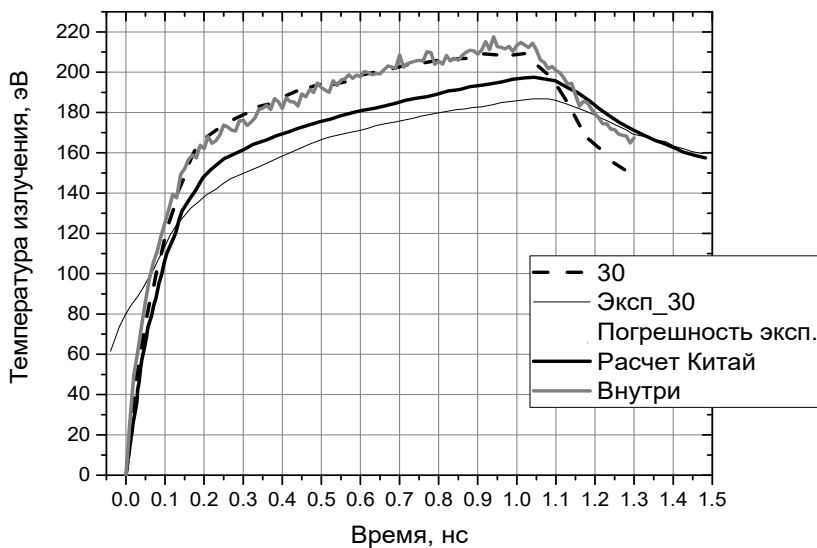


Рис. 6. Временная зависимость температуры излучения. Положение датчика 30°

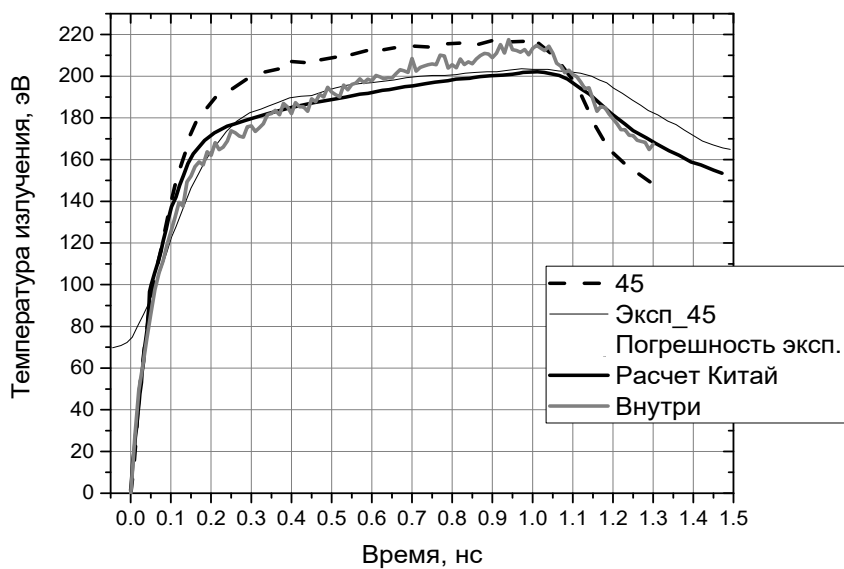


Рис. 7. Временная зависимость температуры излучения. Положение датчика 45°

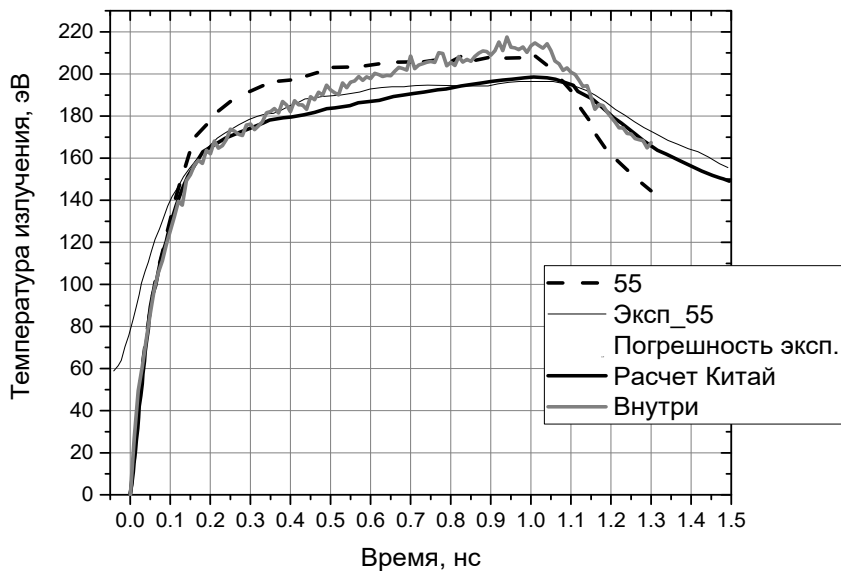


Рис. 8. Временная зависимость температуры излучения. Положение датчика 55°

На рис. 9 показаны сравнения максимальных значений расчетных температур излучения, рассчитанных по выходящему под определенным углом излучению.

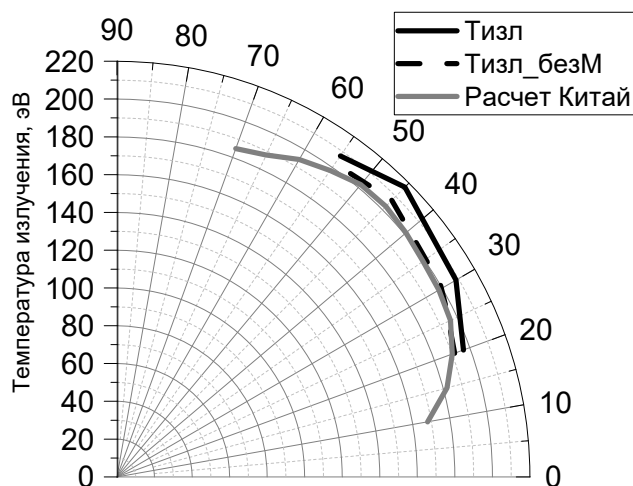


Рис. 9. Расчетные максимумы температур излучения

Результаты расчета эксперимента по конверсии ЛИ в РИ на установке SGIII-Prototype показывают, что в численных расчетах, при моделировании диагностики РИ в лазерных экспериментах необходимо получать данные по выходящему под определенным углом излучению (под углом расположения датчиков диагностики). Только такие данные верно сравнивать с экспериментальными результатами. Расчет дает завышение потока выходящего из бокса излучения так, что температура РИ оказывается выше на ~10 %, по сравнению с экспериментальными данными. Скорость уменьшения потока выходящего из бокса РИ, после окончания действия импульса ЛИ, выше, чем в эксперименте. Форма индикатрисы выходящего

излучения совпадает с полученной формой в аналогичных расчетах, проведенных в Китае, при этом, в обоих расчетах поток РИ, выходящий под углами 20 и 30 градусов, превышает экспериментальное значение [3].

Список литературы

1. 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.
2. Волкова К. А., Кибкало А. А., Моренко Л. З., Змушко В. В., Рыбаченко П. В., Попов А. В., Ватулин В. В., Гнутов А. С., Кузнецов П. Г., Донцов С. А. Современное состояние методики МИММК для расчета лазерных мишеней // Труды XVI международной конференции супервычисления и математическое моделирование. Саров, 2017. С. 81–86.
3. Huo W. Y. et al. First Investigation on the radiation field of the spherical hohlraum. // Phys.Rev.Lett. 2016. 117, 025002.
4. Huo W. Y. et al. // Phys. Plasmas 2010. 17, 123114.
5. Huo W. Y. et al. // Phys. Rev. Lett. 2012. 109, 145004.
6. Zhang H. S. et al. // Phys. Plasmas 2014. 21, 112709.
7. Елисеев Г. М., Жильникова Н. Н., Тихонов А. В. Программа ПЕРСТ-3.1. Некоторые результаты расчетов // III научно-техническая конференция «Молодежь в науке». Саров, 2004. С. 45–48.