

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТРЕХМЕРНЫХ ЗАДАЧ КОНВЕРСИИ ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ В РЕНТГЕНОВСКОЕ В СФЕРИЧЕСКОМ БОКСЕ МЕГАДЖОУЛЬНОЙ ЛАЗЕРНОЙ УСТАНОВКИ

А. В. Бабанов, С. В. Бондаренко, Е. И. Митрофанов, Л. Ф. Потапкина, О. О. Шаров

Российский федеральный ядерный центр –
Всероссийский НИИ экспериментальной физики, Саров

Одним из ведущих направлений исследований по термоядерному синтезу является инерциальный синтез. Данный подход базируется на использовании инерции слоя

термоядерного топлива, предварительно сжатого и ускоренного до высоких скоростей в результате абляционного ускорения оболочечной мишени интенсивным излучением. Рассматривается численное моделирование задач по оптимизации конструкции криогенных мишеней непрямого облучения для получения зажигания, по подбору рентгеновского импульса, для определения динамики поглощения лазерного излучения и характеристики неоднородной генерации рентгеновского излучения на стенках бокса.

В данной работе приведены результаты трехмерных расчетов конверсии лазерного излучения в рентгеновское по методике МИМОЗА-НДЗД.

Ключевые слова: не прямое облучение мишени, сферический бокс-конвертор, лазерное излучение, рентгеновское излучение, пластиковый (СН) аблятор, НДС аблятор.

В данной работе рассматривается трехмерная методика МИМОЗА-НДЗД [1], которая позволяет проводить расчеты движения горячей излучающей плазмы совместно с расчетом переноса излучения в приближении спектральной многогрупповой диффузии и кинетикой ионизации. Рассмотрены основные моменты организации параллельных вычислений. Приведены результаты трехмерных расчетов по конверсии лазерного излучения в рентгеновское в рамках обоснования выбора мишеней, которые предполагается использовать при проведении опытов на лазерной установке [2].

Список моделируемых процессов в трехмерной методике МИМОЗА-НДЗД:

- газодинамическое движение плазмы в многотемпературном приближении,
- поглощение и рассеяние лазерного излучения,
- электронная и ионная теплопроводность,
- спектральный перенос рентгеновского излучения,
- обмен энергией между электронами, ионами и излучением,
- кинетика ионизации в приближении модели среднего иона [3].

Для ускорения времени счета задач использовались следующие методы распараллеливания численной методики МИМОЗА-НДЗД:

- метод трехмерной матричной декомпозиции,
- распараллеливание программы спектральной диффузии по группам спектра,
- мелко-блочное распараллеливание программы кинетики ионизации,
- распараллеливание программы расчета поглощения и рассеяния лазерного излучения.

Распараллеливание программы спектральной диффузии организовано таким образом, что группы спектра рассчитывались на разных процессорах. Предположим, что после геометрической декомпозиции задача считается на M процессорах, тогда в ней $M-1$ подобласть, так как один процессор управляющий. Затем для каждой подобласти добавлялось определенное количество дополнительных $P-1$ процессоров для того, чтобы распределить все спектральные группы между этими P процессорами подобласти. Количество всех процессоров становится $N=(M-1)*P+1$.

Для проверки правильности реализации и анализа эффективности распараллеливания была выбрана задача об обжати стеклянной капсулы, заполненной водородом (рис. 1). На внешней поверхности капсулы задавалась температура излучения.

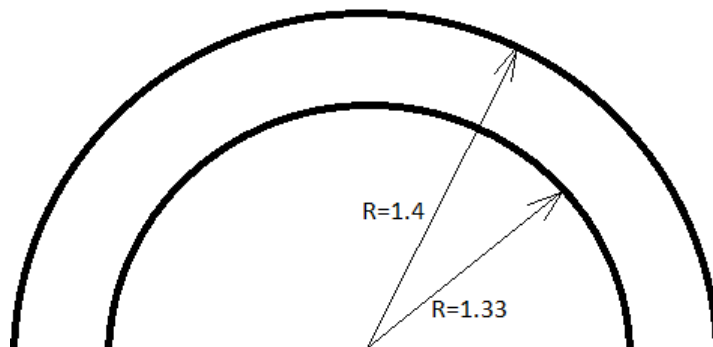


Рис. 1. Начальная геометрия тестовой задачи

Энергетический спектр разбивался равномерно на 46 групп. Пространственная сетка состояла из 90 столбцов, 90 строк и 90 листов (всего 729000 ячеек). Тестовые замеры проводились на момент фокусировки ударной волны в центре капсулы.

Проводилось 3 типа расчетов: 1 – только пространственная декомпозиция, 2 – только декомпозиция энергетического излучения на 2 слоя, 3 – пространственная декомпозиция и декомпозиция энергетического излучения.

Ускорение и эффективность распараллеливания вычислялись по следующим формулам:

$$Sp = \frac{t_N}{t_M}; \quad Eff = Sp \cdot \frac{N}{M} \cdot 100\%$$

где, t_N – время счета задачи на N процессорах, t_M – время счета задачи на M процессорах.

Наибольшее ускорение 1.8 и эффективность 89.84 получено в расчетах типа 3.

В программе кинетики ионизации расчет состояния плазмы осуществляется локально в каждой пространственной точке, поэтому здесь был применен метод мелко-блочного распараллеливания. Все точки подобласти распределялись между P процессорами.

Тестовые расчеты показали, что распараллеливание программ спектральной диффузии и кинетики ионизации не влияет на результаты счета, но позволяет уменьшить календарные сроки расчетов.

Для расчета лазерного энерговыделения использовался метод лучевых траекторий, известный в литературе также под названием «ray tracing». В этом методе начальное распределение интенсивности лазерного пучка разбивается на множество отдельных лучей, каждому из которых присваивается соответствующая доля энергии пучка.

Затем на каждом временном шаге рассчитывается траектория каждого луча внутри системы с учетом преломления и отражения от критических поверхностей.

Траекторию лазерного луча предсказать невозможно, луч неоднократно меняет процессор, поэтому потребовалась разработка алгоритмов для передачи энергии лазера через границу параобластей.

На каждом процессоре определялось количество лазерных лучей, их положение, затем рассчитывались траектории каждого луча до тех пор, пока ослабление из-за поглощения не составит величину 10^{-18} или все они не покинут параобласть. После того как все лучи покинут свои параобласти или ослабнут, определялось новое положение лучей и расчет продолжался до полного ослабления всех лучей или их выхода за пределы геометрии.

При проведении опытов на лазерной установке, при сжатии и генерации нейтронного выхода при непрямом лазерном облучении, предполагается в основном использовать сферический бокс с шестью отверстиями, предназначенными для ввода лазерного излучения. На стенках бокса и самой мишени будет происходить конверсия лазерного излучения в рентгеновское излучение.

Первые расчеты по программам параллельного варианта методики МИМОЗА-НДЗД проводились в замкнутой технологии, когда в качестве входного параметра задавались временная форма лазерного пучка и его энергия.

Бокс-конвертор представлял собой сферическую золотую оболочку толщиной 20 мкм и наружным диаметром 9 мм с 6-ю отверстиями, предназначенными для ввода лазерного излучения (рис. 2). Все 48 лазерных пучков (кластеров) имели одинаковую энергию и полная энергия лазерного излучения, введенного в бокс, была равна 1.4 МДж.

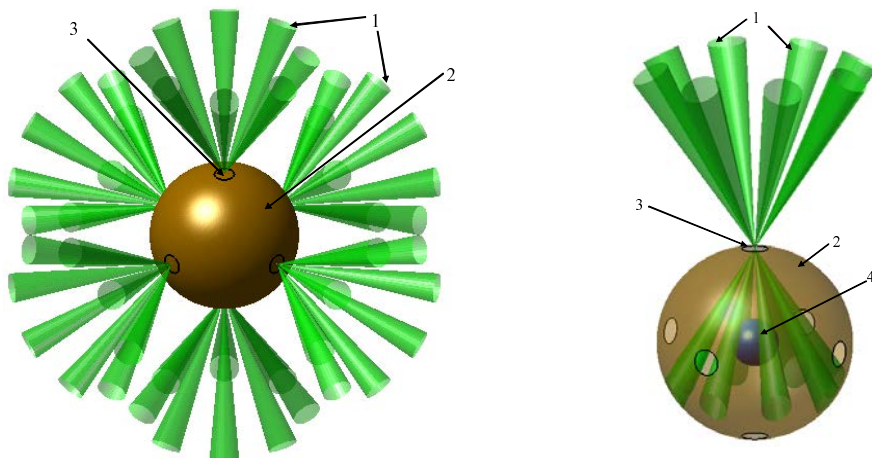


Рис. 2. Схема ввода лазерного излучения внутрь сферического бокса-конвертора: 1 – кластеры лазерных пучков, 2 – сферический бокс, 3 – отверстие для ввода ЛИ, 4 – капсула с термоядерным топливом

Временная форма мощности, подобранная в результате серии расчетов по одномерной методике СНДП [3], у всех лазерных пучков также была одинаковой и совпадала с временной формой мощности лазерного излучения в тестовых расчетах.

В трехмерных расчетах использовалась равномерная сетка, как по полярному θ , так и по азимутальному углу φ : по θ от 0 до 180° – 100 интервалов, по φ от 0 до 360° – 200 интервалов.

При построении сетки два отверстия для ввода лазерного излучения, центры которых лежали на полюсах, получались круглыми, а другие четыре отверстия, центры которых лежали на экваторе, были квадратными.

Геометрия отверстий в трехмерном расчете схематично представлена на рис. 3. Синим цветом обозначена область отверстия, голубым – область лазерного пятна в отверстии.

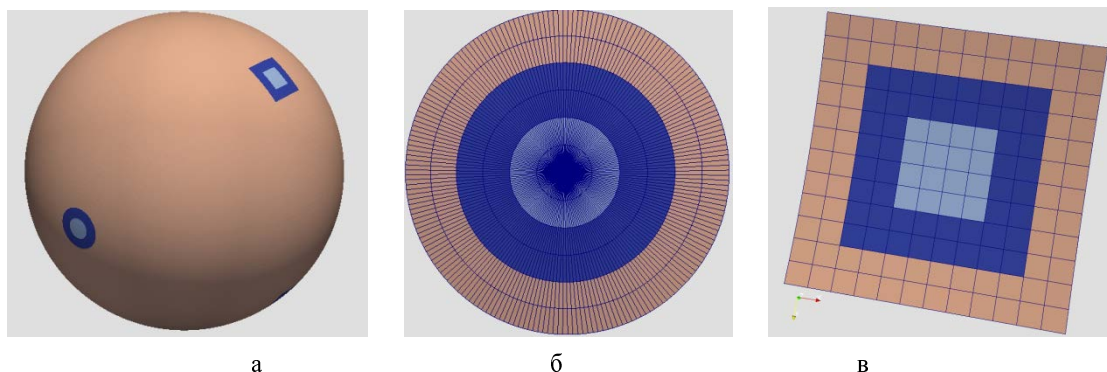


Рис. 3. Геометрия отверстий в трехмерном расчете: а – полная геометрия, б – область лазерного пятна в районе полюса, в – область лазерного пятна в районе экватора

Как видно из рис. 3, количество счетных ячеек в квадратных отверстиях не равно количеству ячеек в круглых отверстиях, поэтому круглым и квадратным отверстиям соответствовало разное количество лучей.

Проведенные трехмерные расчеты для полной геометрии имеют свои достоинства и недостатки. К положительным моментам расчетов в полной постановке можно отнести лучшую наглядность и представительность численных результатов, возможность проявления неочевидных, на первый взгляд, счетных эффектов, связанных с несовершенством используемых физических моделей или индивидуальных особенностей счетной методики.

Недостатками расчетов в полной постановке являются огромные вычислительные ресурсы и возможные неоднозначности с построением расчетной сетки и ее качеством на этапе счета задачи. Первые расчеты бокса с полной геометрией длились в среднем около 8 месяцев.

Проект мегаджоульной лазерной установки предусматривает схему облучения мишени в совокупности обладающую симметриями куба [4]. В этом случае размеры счетной области могут быть значительно уменьшены – в 48 раз, а, следовательно, и время счета задачи существенно сокращается.

Например, такая область может быть получена путем рассечения шара радиуса R тремя плоскостями: $z = 0$, $x = y$, $z = y$ (в качестве полярной оси выбрана ось X). В сферической системе координат неравенства, определяющие границы такой уменьшенной счетной области, имеют вид:

$$\left\{ \begin{array}{l} 0 \leq \varphi \leq \frac{\pi}{4} \\ 0 \leq \theta \leq \arccos \left(\frac{1}{\sqrt{2 + (tg\varphi)^2}} \right), \\ 0 \leq r \leq R \end{array} \right. \quad (1)$$

где θ – полярный угол, отсчитываемый от оси X , φ – азимутальный угол, отсчитываемый от оси Z .

Были проведены сравнительные трехмерные расчеты «1/48» для фрагмента бокса, в котором количество точек было уменьшено в 32 раза. Календарное время счета сократилось до трех недель.

По методике МИМОЗА-НДЗД был проведен трехмерный расчет конверсии лазерного излучения в рентгеновское в боксе для капсулы с аблятором из высокоплотного углерода (HDC – high-density carbon).

Счетная область была ограничена в соответствии с неравенствами (1), а ось отверстия для ввода лазерного излучения совпадала с полярной осью X .

На рис. 4,а, б приведена геометрия отверстия, начальная расстановка точек по полярному углу θ , направления осей и разностная сетка в трехмерной задаче на начальный момент времени.

На внешней границе счетной области задавались граничные условия в виде свободной границы как по спектральной диффузии, так и по газовой динамике. По электронной и ионной теплопроводности в качестве граничного условия использовалось условие равенства нулю потока тепла.

На плоскостях: $z = 0$, $x = y$, $z = y$ в качестве граничного условия по теплопроводности задавалась условие равенства нулю потока тепла, по газовой динамике задавалось условие: скорость равна 0.

Лазерный луч при распространении внутри бокса при попадании на плоскости $z = 0$, $x = y$, $z = y$ испытывал зеркальное отражение.

Временная зависимость мощности лазерного импульса с длиной волны $\lambda_L = 0,53$ мкм, введенного внутрь бокса, имела вид: $\frac{1}{48} P_L(t)$, где $P_L(t)$ – была подобрана в результате серии расчетов по одномерной методике СНДП.

Лазерное излучение задавалось в центре отверстия 384 лучами, объединенными в 48 пучков по 8 лучей, каждому из которых присваивалась соответствующая доля энергии пучка. Угол между направлением ввода лазерного излучения и осью отверстия был равен 30° .

Спектр излучения рассчитывался на сетке из 45 спектральных групп на интервале от 0 до 4 кэВ. Разбиение диапазона спектра на спектральные группы произведено следующим образом: от 0 до 0.5 – 10 групп равномерно, то 0.5 до 4 – 35 групп равномерно.

При счете 45 спектральных групп были разделены на 5 интервалов, таким образом, в программе спектральной диффузии на каждом счетном процессоре рассчитывалась определенная часть спектра, состоящая из 9 групп. В программе кинетики ионизации на каждом счетном процессоре рассчитывалась 1/5 часть точек подобласти.

При таком распараллеливании программ спектральной диффузии и кинетики ионизации получено ускорение счета задачи 3.3475, эффективность распараллеливания составила 71 %.

На рис. 4, а, б, в приведены распределения электронной температуры в одном из сечений ($\varphi = \varphi^* = 31,875^\circ$) на 3 момента времени: $t = 0,8$, $t = 4$ и $t = 6,4$ нс.

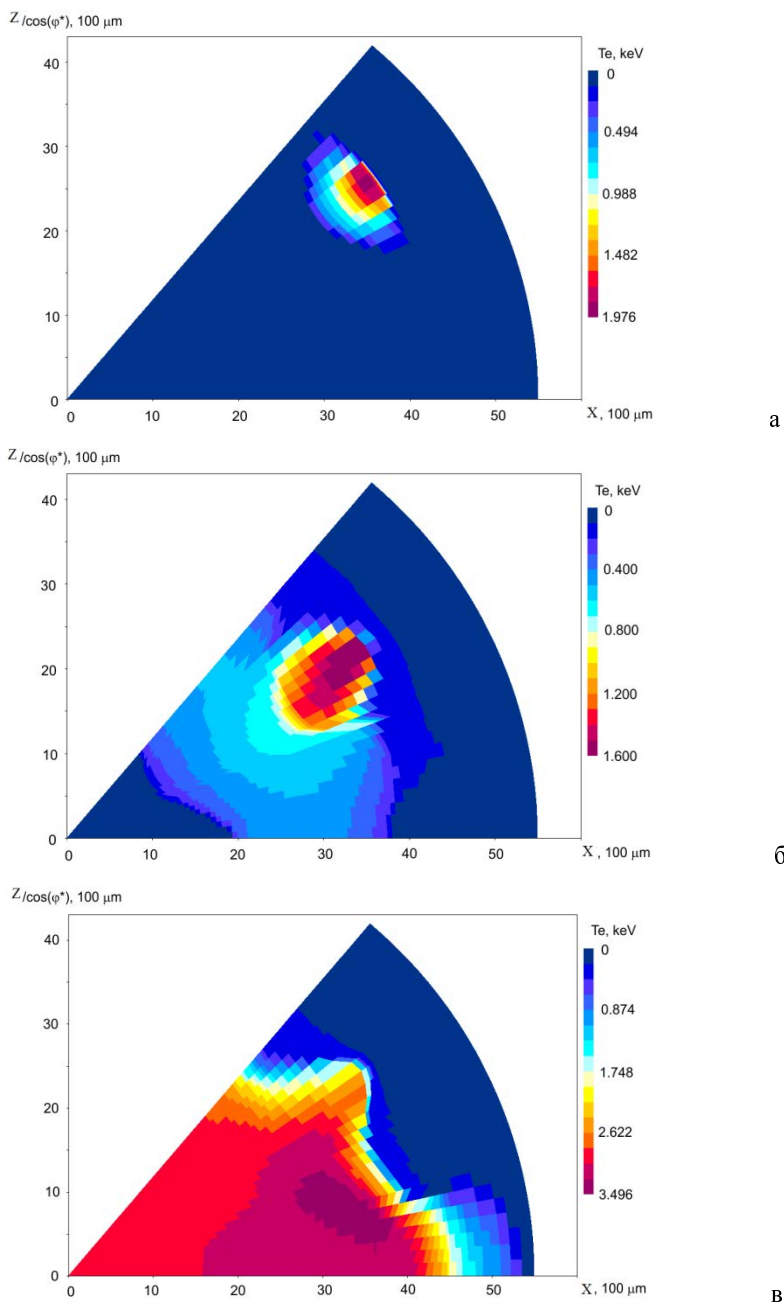
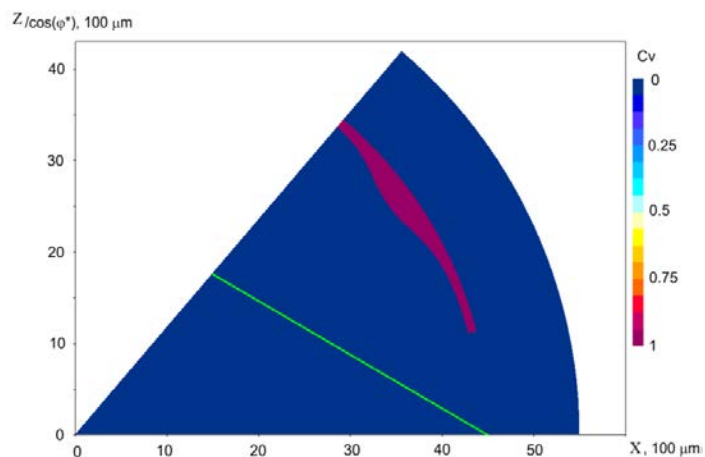
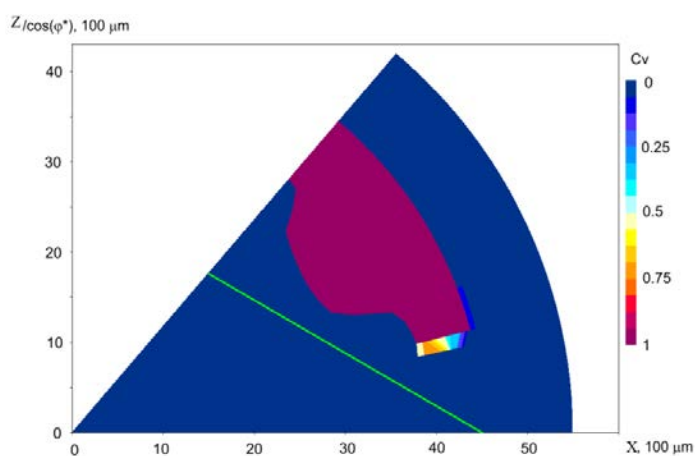


Рис. 4. Пространственные распределения электронной температуры T_e в одном из сечений ($\varphi = \varphi^* = 31,875^\circ$) на 3 момента времени: а – $t = 0,8$ нс, б – $t = 4$ нс, в – $t = 6,4$ нс

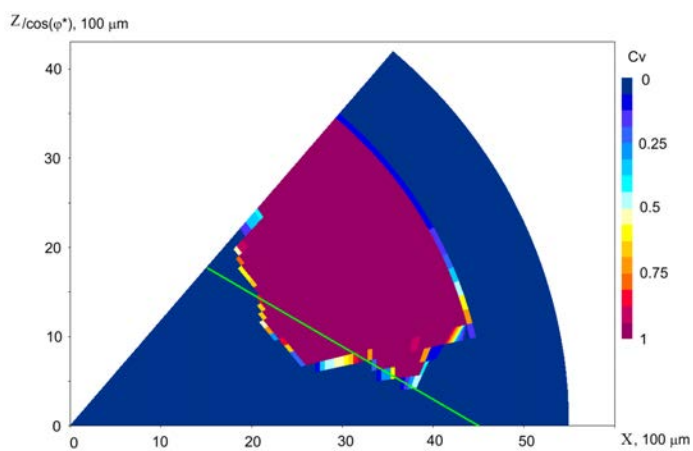
На рис. 5,а, б, в приведены распределения объемной концентрации золота в одном из сечений ($\varphi = \varphi^* = 31,875^\circ$) на 3 момента времени: $t = 0,8$, $t = 4$ и $t = 6,4$ нс.



а



б



в

Рис. 5. Пространственные распределения объемной концентрации золота C_v в одном из сечений ($\varphi = \varphi^* = 31,875^\circ$) на 3 момента времени: а – $t = 0,8$ нс, б – $t = 4$ нс, в – $t = 6,4$ нс

Как видно из рис. 6,а, б, в, к моменту времени $t = 6,4$ нс золотая плазма, прилетевшая со стенок бокса, оказывается на пути лазерного излучения, которое в основном поглощается вблизи отверстия, что видно из распределения температуры электронов на рис. 5,в.

Результаты трехмерных расчетов согласуются с ранее полученными одномерными расчетами, а также выявляют наличие еще одного фактора, влияющего на симметрию рентгеновского излучения.

Трехмерные расчеты показали, что внутренний объем бокса заполняется золотой плазмой, испаренной с его стенок, и эта плазма становится непрозрачной для лазерного излучения. Основная часть импульса поглощается внутри бокса вблизи отверстий ввода, что может привести к снижению симметрии рентгеновского излучения в центре бокса по сравнению со случаем, когда все лазерные пучки доходят до стенки бокса.

Следует предпринять дополнительные меры для сдерживания разлета плазмы со стенок бокса, например, заполнять бокс буферным газом. Необходимо также учесть в расчетах влияние потоков плазмы с капсулы и активную динамику разлета пленки, закрывающей отверстия.

Для подбора различных параметров в задаче конверсии лазерного излучения однозначно рекомендуется проводить расчеты для фрагмента «1/48» задачи, однако, для получения полной картины все же необходимо проведение чистового расчета с полной геометрией.

Литература

1. Бабанов А. В., Бельков С. А. и др. Методика МИМОЗА-НДЗД. Расчет трехмерных задач спектрального переноса излучения // Вопросы атомной науки и техники. Сер.: Математическое моделирование физических процессов. 2012. Вып. 2. С. 64–72.
2. Гаранин С. Г. Мощные лазеры и их применение в исследованиях физики высоких плотностей энергии // УФН. 2011. Т. 181, № 4. С. 434–441.
3. Бельков С. А., Долголева Г. В. Модель среднего иона для расчета кинетики ионизации, населенностей возбуждения уровней и спектральных коэффициентов переноса излучения в программе СНДП // Вопросы атомной науки и техники. Сер.: Математическое моделирование физических процессов. 1992. Вып. 1. С. 59–61.
4. Бельков С. А., Бондаренко С. В., Вергунова Г. А. и др. Влияние пространственной неоднородности нагрева на сжатие и горение термоядерной мишени при прямом многопучковом облучении лазерным импульсом мегаджоульного уровня // ЖЭТФ. 2017. Т. 151. Вып. 2. С. 396–408.

NUMERICAL SIMULATION OF 3D PROBLEMS OF LASER-INTO-X-RAY RADIATION CONVERSION IN A SPHERICAL HOHLRAUM OF MEGA-JOULE LASER FACILITY

A. V. Babanov, S. V. Bondarenko, E. I. Mitrofanov, L. F. Potapkina, O. O. Sharov

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

One of the leading research trends in thermonuclear fusion is the inertial fusion. This approach is based on implementation of the inertia of the layer of thermonuclear fuel that was preliminary compressed and accelerated up to high velocities as a result of ablation acceleration of the shell target with intensive radiation.

Numerical simulation of the problems to optimize the design of cryogenic targets for indirect irradiation to produce the ignition, to select an X-ray pulse, to determine the laser radiation absorption dynamics and to characterize heterogeneous generation of the R-ray radiation at the walls of the hohlraum is considered.

The presentation describes the results of 3D computations on laser radiation conversion into the X-ray radiation using MIMOZA-ND3D-method.

Key words: indirect target irradiation, spherical hohlraum, laser radiation, X-ray radiation, plastic (CH) ablator, HDC ablator.