

4. Liu J., Corrigan A., Kailasanath K., Ramammurti R., Heeb N., Munday D., Gutmark E. E. Impact of Deck and Jet Blast Deflector on the Flow and Acoustic Properties of Imperfectly Expanded Supersonic Jets // AIAA Paper. 2013. № 2013-323

5. <http://www.navybmr.com/>

СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ МЕТОДИКИ МИММК ДЛЯ РАСЧЕТА ЛАЗЕРНЫХ МИШЕНЕЙ

*К. А. Волкова, А. А. Кибкало, Л. З. Моренко, В. В. Змушко, П. В. Рыбаченко,
А. В. Попов, В. В. Ватулин, А. С. Гнутов, П. Г. Кузнецов, С. А. Донцов*

Российский Федеральный Ядерный Центр –
Всероссийский НИИ экспериментальной физики, г. Саров

Методика МИММК была разработана в 2000-х годах и предназначалась для моделирования методом Монте-Карло спектрального переноса излучения на двумерном газодинамическом разрезе методики МИМОЗА в режиме параллельных вычислений [0, 0].

В нелинейных задачах переноса излучения на каждом временном шаге разностным методом решаются уравнения газодинамики в двумерной постановке, затем методом Монте-Карло моделируется перенос излучения в приближении локального термодинамического равновесия (ЛТР). Со временем были написаны программы моделирования лазерного излучения для более полного учета процессов, протекающих в лазерных мишенях.

Трехмерная версия методики МИММК создана на основе методики МИМОЗА-НДЗД [0] и предназначена для решения трехмерных неравновесных задач с учетом следующих физических процессов (первые два процесса считаются по программам Монте-Карло, остальные по программам МИМОЗА-НДЗД):

- перенос и поглощение энергии лазерного излучения (ЛИ) в приближении геометрической оптики (с учетом степени ионизации плазмы и обратно-тормозного механизма поглощения),
- спектральный перенос рентгеновского излучения (РИ),
- газодинамическое движение плазмы (ГД),
- электронная теплопроводность с возможностью ограничения (ЭТП),
- ионная теплопроводность (ИТП),
- обмен энергией между электронами и ионами (ОБМЕН).

В двумерной методике вызов всех подпрограмм МИМОЗА (МИМ) и подпрограмм Монте-Карло (МК) осуществлялся на каждом шаге во времени последовательно, в соответствии с нумерацией программ в методике МИМОЗА (рис. 1). Программы МИМ работали на 2 процессорах – базовом и рабочем, остальные процессоры использовались только для моделирования переноса частиц методом Монте-Карло.



Рис. 1. Последовательность работы программ в двумерной методике МИММК

Реализованный алгоритм не ограничивает число используемых процессоров. Величина статистической погрешности уменьшается в \sqrt{N} раз (где N – число процессоров) по сравнению с однопроцессорным расчетом.

Первая версия трехмерной методики МИММК была основана на такой же схеме распараллеливания. Для шага МК были реализованы новые алгоритмы моделирования источника и траекторий частиц, соответствующие трехмерному заданию ячеек в МИМОЗА-НДЗД. Однако этот вариант распараллеливания оказался неэффективным в расчете трехмерных задач. Так, например, если эффективность счета двумерной задачи составляла $\sim 95\%$, то в расчете этой же задачи в трехмерной постановке для 40 листов по азимуту эффективность вычислений падала до значений $\sim 3-5\%$. Для повышения эффективности счета был изменен алгоритм связи программ МИМ и МК и реализовано распараллеливание счета по физическим процессам. А именно, счетные программы МИМ работают на одной группе процессоров, а программы МК – на другой. В каждой группе выделен базовый процессор для обмена информацией между группами (рис. 2).



Рис. 2. Блок-схема работы модифицированной программы МИМОЗА-НДЗД на одном счетном шаге по времени

В актуальной версии МИММК есть возможность вызывать программы МК не на каждом шаге МИМ, а с определенной частотой, а также менять число процессоров МК, не меняя количество процессоров МИМ, что позволяет повысить устойчивость решения и поддерживать высокий уровень эффективности счета.

Первые расчеты по трехмерной версии программы выполнялись с целью уточнения некоторых рабочих параметров мегажоульной лазерной установки. В них моделировалась конверсия лазерного излучения в рентгеновское для геометрии сферического бокса, внутренняя поверхность которого покрыта золотом. В каждое из шести отверстий ввод лазерной энергии производится 8 пучками равномерно (рис. 3,а). На рис. 3,б приведена визуализация положения пятен засветки и траекторий лазерных лучей, проходящих через одно отверстие ввода ЛИ. Эти данные были получены аналитически в приближении геометрической оптики, исходя из информации о параметрах системы ввода ЛИ.

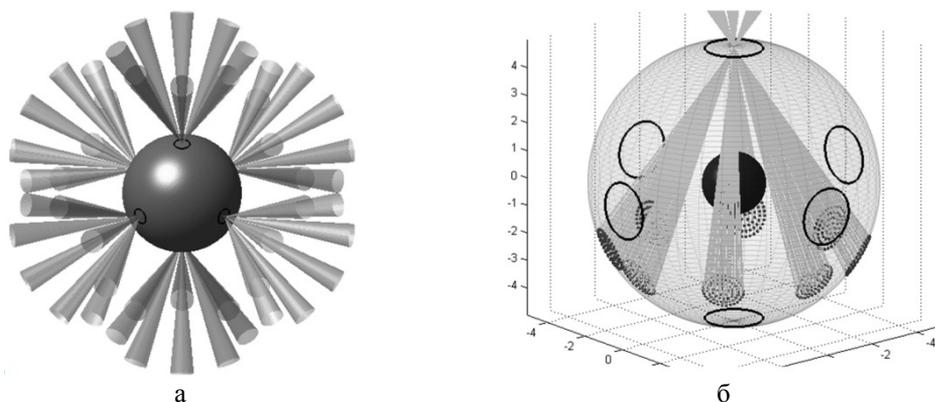


Рис. 3. Схема ввода 48 лазерных кластеров в сферический бокс-конвертер (а); положения пятен засветки и траектории лазерных лучей, проходящих через одно отверстие ввода ЛИ (б)

В задаче оценивалась динамика температуры и степень однородности поля рентгеновского излучения вокруг капсулы с ДТ-топливом, расположенной в центре бокса. Расчеты показали, что температура излучения вблизи золотой оболочки в разных листах сильно отличается и соответствует профилям лазерной засветки. У поверхности капсулы температуры в листах имеют близкие значения.

Более подробные численные исследования влияния трехмерности на процессы, проходящие в системе, были проведены в 2015 году на мишени с цилиндрической геометрией. Целью расчетов было прогнозирование условий проведения предстоящих экспериментов на лазерной установке мегаджоульного класса. По двумерной и трехмерной версии МИММК были проведены расчеты в одинаковой постановке.

В центре цилиндрического бокса с золотыми стенками и 2-мя отверстиями для ввода ЛИ на торцах (рис. 4,*а*) помещена капсула.

Полость бокса заполнена малоплотным газом. В центры отверстий направлены пучки лазерного излучения с суммарным количеством энергии 2,0 МДж при длительности импульса 6,5 нс. Взаимодействие РИ с веществом моделировалось с использованием спектральных (1000 групп) сечений, рассчитанных по программе ПЕРСТ-3.1 [0].

На рис. 4,*б* приведена пространственная сетка (100 строк, 40 столбцов) в 2D расчете. 3D сетка образована путем разворота 2D сетки на 40 листов. В двумерном расчете лазерное излучение вводится под определенными углами относительно осей, всего 6 пучков. В трехмерном расчете лазерное излучение вводится под теми же углами и разворачивается в азимутальной плоскости на 8 лучей (всего 48 пучков). Отличие в способе ввода лазерного излучения приводит к тому, что в трехмерном случае на поверхности цилиндра образуются пятна, в то время как в двумерном случае энергия лазера распределяется равномерно по полосе.

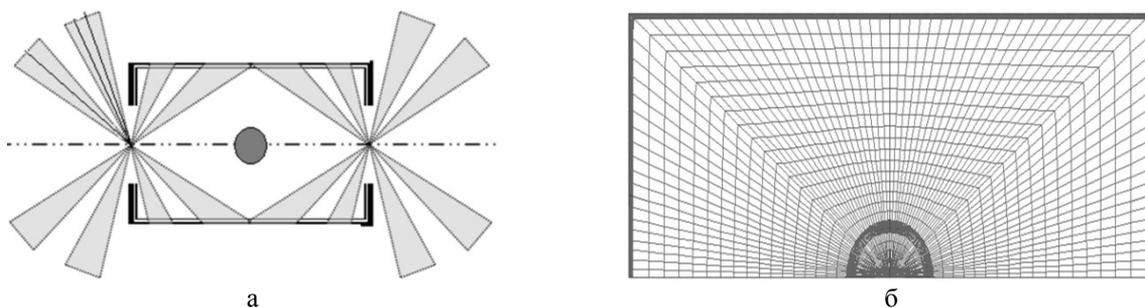


Рис. 4. Геометрия системы и схема ввода лазерных пучков в цилиндрический бокс-конвертер (а); сеточное описание системы в плоскости XY (б)

На рис. 5 показаны контуры лазерных пятен на внутренней поверхности цилиндра, полученные при 3D моделировании. Выбранное сеточное представление системы в 3D геометрии приводит к циклическому распределению пятен засветки по поверхности цилиндра, поэтому для анализа решения достаточно рассматривать результаты на листах 1–5.

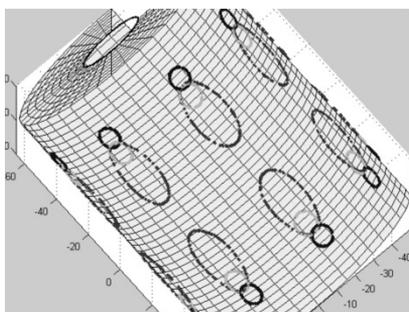


Рис. 5. Контуры лазерных пятен, полученные при 3D моделировании

Для иллюстрации циклического распределения энергии выберем контрольные точки в области падения лазерного луча. Их расположение на момент окончания импульса приведено на рис. 6,*а*.

На рис. 6,б представлено распределение лазерной энергии в 3D расчете в отмеченных точках как функции азимутального угла на момент окончания импульса. Полученные кривые хорошо согласуются с картой распределения лазерных пятен, представленной на рис. 5.

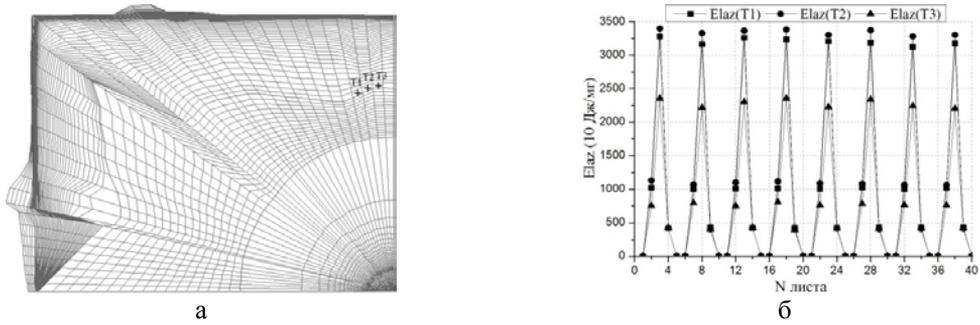


Рис. 6. Контрольные точки выдачи лазерной энергии для 3D расчета (а); лазерная энергия в точках T1, T2, T3 как функция азимутального угла (б)

Для исследования зависимости температуры излучения от времени, в граничном к капсуле слое вакуума выберем контрольные точки (рис. 7,а). На рис. 7,б–г приведены сравнительные результаты, полученные в 2D и 3D расчетах для этих точек. Для 3D расчета представлено усредненное по 5 листам значение температуры. В точке T0 наблюдаются значительные флуктуации температуры. Это связано с тем, что из-за малого объема ячеек вблизи оси вероятность попадания в них моделируемых частиц мала.

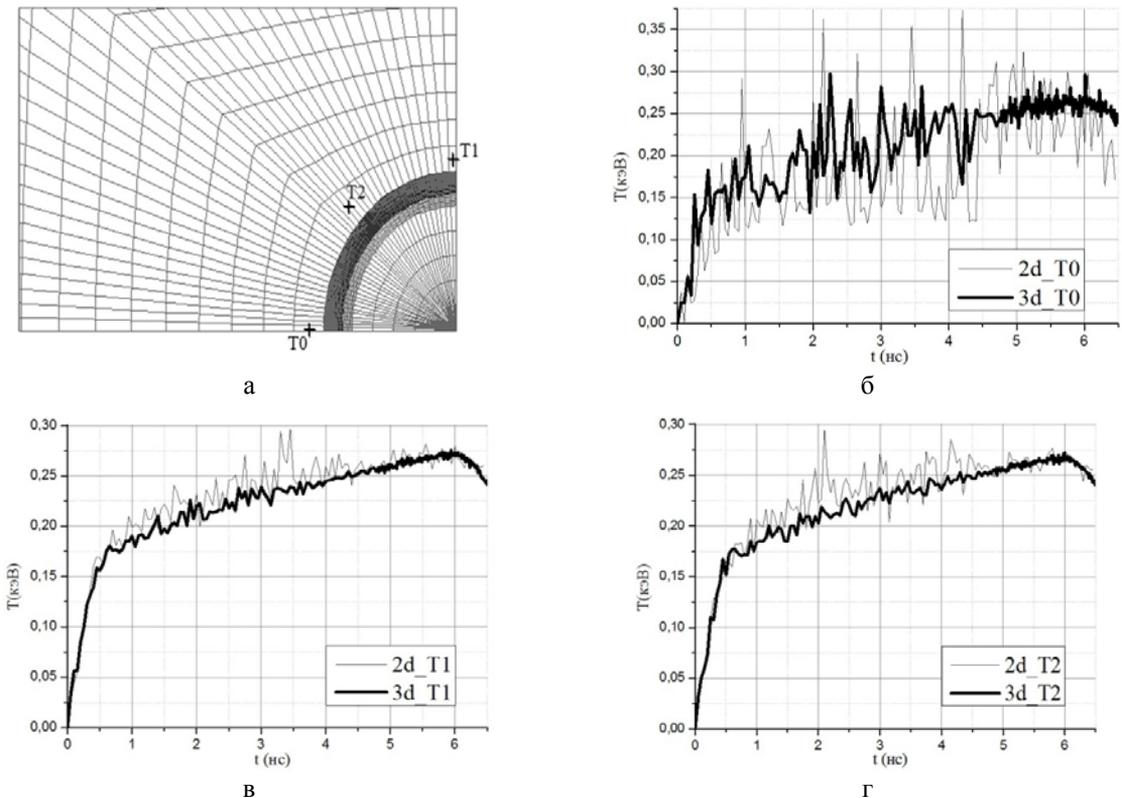


Рис. 7. Контрольные точки (а); температура фотонов в зависимости от времени в контрольных точках (б–г)

Для оценки симметрии решения в 2D и 3D расчетах по μ -косинусу полярного угла рассмотрим распределение температуры фотонов на определенном радиусе, расположенном над поверхностью капсулы на момент окончания действия источника.

Как видно из рис. 8, *а*, асимметрия поля излучения вокруг капсулы по полярному углу в 2D расчете несколько больше, чем в 3D расчете. Она составляет примерно 2,5–3 %, тогда как в 3D всего 1,5–2 %. Это отличие появляется с определенного момента времени из-за большего разлета плазмы возле входного отверстия. В 3D расчете аналогичный процесс протекает медленнее, и асимметрия излучения остается на том же уровне.

Для оценки симметрии 3D-решения в азимутальном направлении, выделим на внешней поверхности капсулы три сферических пояса, соответствующих контрольным точкам, выбранным нами ранее (рис. 7, *а*). Выбранные поверхности образованы внешними сферическими границами соответствующих ячеек. Рассмотрим на этих поверхностях зависимость температуры излучения от N – номера листа 3D-разреза (изначально листы расположены вокруг оси OX с шагом 9° по θ). На рис. 8, *б* на момент, когда начинает падать мощность лазерного источника, приведены температуры фотонов, усредненные в соответствии с цикличностью источника. Видно, что флуктуации температуры излучения в азимутальном направлении в среднем не превосходят 0,5 % и ниже, чем флуктуации по полярному углу.

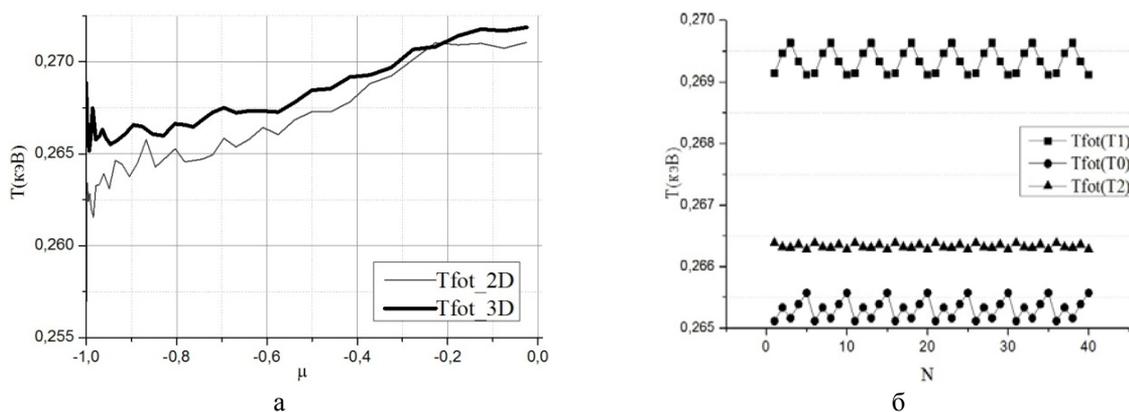


Рис. 8. Распределение температуры фотонов над поверхностью капсулы (а); зависимость температуры фотонов от азимутального угла в контрольных точках (б)

На рис. 9 представлена форма ударной волны, полученная в капсуле в 3D и 2D расчетах на момент окончания лазерного импульса. Цветом обозначено расстояние от центра мишени до ячеек с максимальной плотностью. Таким образом, плотность на полученной поверхности не является одинаковой (а просто максимальной для каждого направления), и также распределена неравномерно. Предположительно, симметрию сжатия можно улучшить, например, изменив форму капсулы или, по возможности, переместив пятна ЛИ ближе к отверстиям ввода, таким образом, сфера будет медленнее сжиматься по экватору.

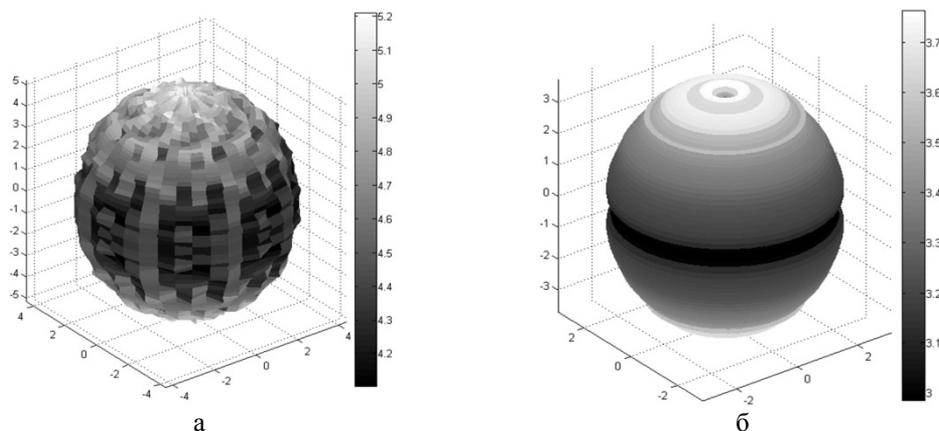


Рис. 9. Форма ударной волны на момент окончания лазерного импульса: а – в 3D расчете, б – в 2D расчете

Расчеты были проведены до момента окончания действия лазерного импульса. В таблице приведены параметры счета задач для 2D и 3D расчетов.

Параметры счета

	2D	3D
Число процессоров	160	800
Число частиц лазерного источника	100	1000
Число частиц объемного источника	100	100
Время счета (календарных часов)	70	3000
Эффективность	~ 97 %	~ 90 %

Таким образом, на основе полученных результатов можно сделать следующие заключения:

- создан трехмерный вариант методики МИММК, расширяющий возможности численного моделирования экспериментов на лазерных установках;
- расчеты задачи в двумерной и трехмерной постановке по методике МИММК дали согласованные результаты;
- несмотря на высокую эффективность трехмерных расчетов, двумерная методика МИММК остается актуальной в силу своей экономичности.

Литература

1. Моренко Л. З., Рябикина Н. А., Кибкало А. А. Моделирование спектрального переноса излучения методом Монте-Карло в режиме параллельных вычислений // Вопросы атомной науки и техники. Сер. Математическое моделирование физических процессов. 2001. Вып. 4. С. 42–47.
2. 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. 41–51.
3. Бабанов А. В., Бельков С. А., Бондаренко С. В. 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.
4. Елисеев Г. М., Жильникова Н. Н., Тихонов А. В. Программа ПЕРСТ-3.1. Некоторые результаты расчетов // VI научно-техническая конференция «Молодежь в науке»: сб. докл. Саров, 2–4 ноября, 2004. С. 45–48.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛОКОМФОРТА ЧЕЛОВЕКА В МОДУЛЕ ЛОГОС. АЭРОДИНАМИКА

Н. Г. Галанов, Р. Н. Жучков

Российский федеральный ядерный центр –
Всероссийский НИИ экспериментальной физики, г. Саров

В повседневной жизни люди проводят достаточно много времени в закрытых пространствах, имеющих различные системы кондиционирования, предназначенные для обеспечения комфортных условий, т.е. состояния теплокомфорта. При проектировании новых систем кондиционирования априорная экспериментальная оценка теплового комфорта представляется сложной и дорогостоя-