

Значительный интерес вызывает проблема разрешимости уравнения (9) с оператором столкновений Больцмана (4). Наличие решений у этого уравнения может дать новый класс точных решений уравнения Больцмана вида (16) с диссипативными свойствами в дополнение к классу решений А. В. Бобылева [2, 3].

Работа выполнена при поддержке РФФИ, грант № 18-01-00343.

Литература

1. Галкин В. А. Анализ математических моделей: системы законов сохранения, уравнения Больцмана и Смолуховского. – М.: БИНОМ, 2009.
2. Бобылев А. В. О точных решениях уравнения Больцмана // Докл. АН СССР. – 225, № 6, – 1296 – 1299.
3. Бобылев А. В. Об одном классе инвариантных решений уравнения Больцмана // Докл. АН СССР. – 231, № 3, – 571 – 574 .

SOME UNSOLVED ISSUES IN PHYSICAL KINETICS PROBLEMS

V. A. Galkin

Surgut State University, Surgut

A class of stationary problems with a source of particles is considered for physical kinetics equations with operators of Boltzmann-type collisions. We suggest an algorithm to construct dissipative solutions that allows finding accurate solutions of non-stationary Smolukhovsky equation for the spatially uniform systems with multiplicative nucleus of particles coalescence. The algorithm to construct such solutions is substantiated. An important specific feature of this class of solutions is the fact that the operator of collisions here is disruptive in the rate of permanence relation. The problem of existence of such solutions in the case of the operator of Boltzmann collisions of the gas kinetic theory is formulated that would allow complementing the class of exact solutions by A.V. Bobylev with dissipative solutions.

Key words: physical kinetics, operators of Boltzmann-type and Smolukhovsky-type collisions, disruptive instructions, conservation law, exact solutions, dissipative solutions.

УДК 519.6, 533.7, 533.9

ТРЕХМЕРНЫЙ РАСЧЕТ ЭКСПЕРИМЕНТА НА УСТАНОВКЕ NIF: СХЕМА ВВОДА ЛИ В БОКС-КОНВЕРТОР И СЖАТИЕ ТЕРМОЯДЕРНОЙ МИШЕНИ

А. С. Гнутов, С. А. Донцов, Д. М. Линник, Л. Ф. Потапкина, П. В. Рыбаченко

Российский федеральный ядерный центр –
Всероссийский НИИ экспериментальной физики, Саров

В данной работе рассматривается программная реализация, требуемая для численного моделирования процесса обжаривания термоядерной мишени для условий работы установки National Ignition

Facility (NIF) [1], приведены результаты трехмерного расчета в сквозной постановке, проведено сравнение доступными экспериментальными результатами.

Ключевые слова: лазерная мишень, бокс-конвертор, лазерное излучение, спектральный перенос излучения, параллельные вычисления.

Исследования в области инерциального термоядерного синтеза (ИТС) являются одним из основных направлений работ на мощных лазерных установках. Качественная оптимизация постановки экспериментов на лазерных установках и достижение понимания физики термоядерного зажигания требуют наличия соответствующего расчетно-теоретического сопровождения. Во ВНИИЭФ широко представлена программа расчетных исследований в области ИТС. По программе СНДП [2] проводятся одномерные расчёты по оптимизации конструкции криогенных мишеней непрямого облучения для получения зажигания, по подбору параметров для рентгеновского излучения, сжимающего мишень, определяется временная форма лазерного импульса, позволяющая достичь необходимой для условий зажигания температуры рентгеновского излучения в боксе. Существующие двумерные методики позволяют проводить расчётные исследования обжаривания термоядерной мишени в сквозной постановке [3]. Однако для более полного и точного описания процессов, происходящих в термоядерной мишени, требуется проведение полноценных 3-х мерных расчётов.

Трёхмерная методика МИМОЗА-НДЗД [4] позволяет проводить расчеты движения неравновесной плазмы, образовавшейся в результате воздействия на исходное вещество мощного лазерного излучения, совместно с расчетом кинетики ионизации и переноса рентгеновского излучения в приближении спектральной многогрупповой диффузии.

В данной работе представлены результаты трехмерного расчёта по методике МИМОЗА-НДЗД одного из опытов по непрямому облучению ДТ-капсулы, проведенного на установке NIF. В опытах по непрямому облучению лазерное излучение (ЛИ) установки направляется на стенки бокса-конвертора (хольраума), разогретые стенки бокса заполняют полость бокса мягким рентгеновским излучением (РИ). Под воздействием потока РИ происходит сжатие термоядерной ДТ-капсулы, размещенной в боксе. Схема опыта представлена на рис. 1.



Рис. 1. Схема проведения опыта на установке NIF [5]

Лазерная установка NIF построена в Ливерморской национальной лаборатории (США) в 2009 г. NIF обладает 192 лазерными лучами, объединенными в 48 кластеров по 4 луча, суммарной энергией лазерного излучения (ЛИ) до 1,9 МДж на третьей гармонике неодимового лазера (длина волны ЛИ 0,351 мкм). Для моделирования в данной работе был выбран эксперимент с номером № 111215 [6] из серии «low-foot». Для выбранного эксперимента в открытых источниках имеется достаточно информации для полноценной постановки расчета.

Выстрел № 111215 был произведен с использованием цилиндрического «575-хольраума» [7]. Стандартный «575-хольраум» имеет внутреннюю полость длиной 9,425 мм и внутренний радиус 2,875 мм. Внутренняя поверхность хольраума покрыта 50 мкм слоем золота. В качестве внешней стенки на золото нанесен слой полиэтилена СН толщиной 80 мкм. Внутренняя полость бокса заполнена гелием плотностью $0,96 \text{ мг/см}^3$. В центре обоих торцов цилиндра имеются отверстия для ввода ЛИ, в эксперименте № 111215 размер отверстий был нестандартным диаметром 3,375 мм [6].

Внутри бокса-конвертора находится капсула, которая представляет собой сферическую оболочку (аблятор) из нескольких слоев пластика СН с различным добавлением кремния Si общей толщиной 196 мкм и внешним радиусом 1,13 мм. На внутреннюю поверхность наморожен сферический слой ДТ-льда толщиной 68 мкм. Внутренняя полость заполнена ДТ газом плотностью $0,3 \text{ мг/см}^3$. Разрез капсулы схематично представлен на рис. 2.

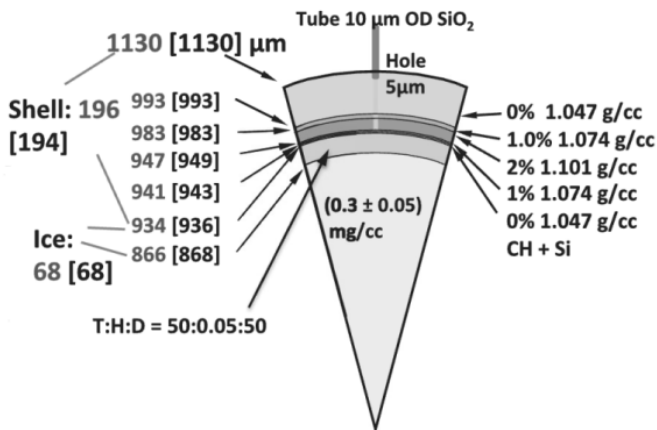


Рис. 2. Разрез термоядерной капсулы для выстрела № 111215 на установке NIF [6]

Через каждое из входных отверстий внутренняя поверхность бокса облучается пучками лазерного излучения (ЛИ), которые входят в бокс под углами примерно 50° , $45,5^\circ$, 30° и $23,5^\circ$. Отдельные лучи в одном пучке ЛИ в расчете задавались параллельными друг другу. Пучки ЛИ входящие в бокс под углами 50° (4 пучка с одной стороны) и $45,5^\circ$ (4 пучка) составляют внешнее кольцо засветки, а пучки, входящие под углами 30° (8 пучков) и $23,5^\circ$ (8 пучков) - внутреннее кольцо засветки. Полная энергия и зависимость мощности ЛИ у внутренних и внешних пучков различны. В эксперименте полная энергия внутренних лучей 0,5 МДж, внешних – 1 МДж. Временная зависимость мощности ЛИ взята из работы [8] с поправками из [9], положения пятен лазерной засветки на поверхности бокса и размеры пучков ЛИ взяты из работы [10]. Схема ввода лучей в 575-хольраум представлена на рис. 3.

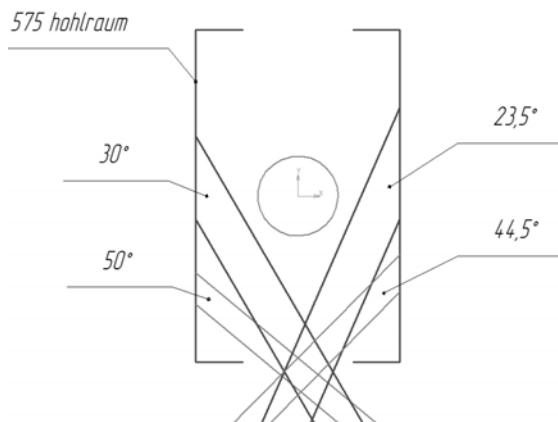


Рис. 3. Схема ввода лазерного излучения в бокс-конвертор в опытах на установке NIF

Пучки ЛИ попарно образуют два кольца засветки «внешнее» и «внутреннее». На рис. 4 представлен общий вид интенсивности засветки, на рис. 5 представлена азимутальная развертка с положением лазерных пятен.

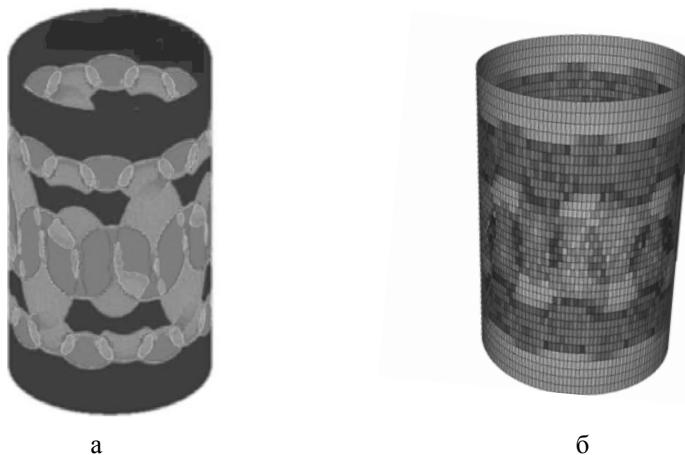


Рис. 4. Общий вид интенсивности засветки:
а – в экспериментах на установке NIF; б – в трёхмерном расчете

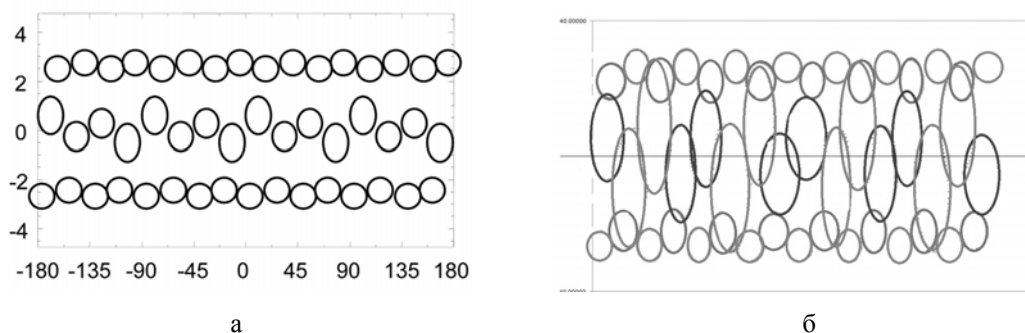


Рис. 5. Азимутальная развертка с положением лазерных пятен:
а – в экспериментах на установке NIF; б – в трёхмерном расчете

На рис. 6 приведены азимутальные углы для каждого пучка в экспериментах на установке NIF и для проведенного трёхмерного расчета. Ближайшие к центру пучки заходят под полярным углом 23,5 градуса, лежащие чуть дальше – 30°, затем 44,5° и 50°.

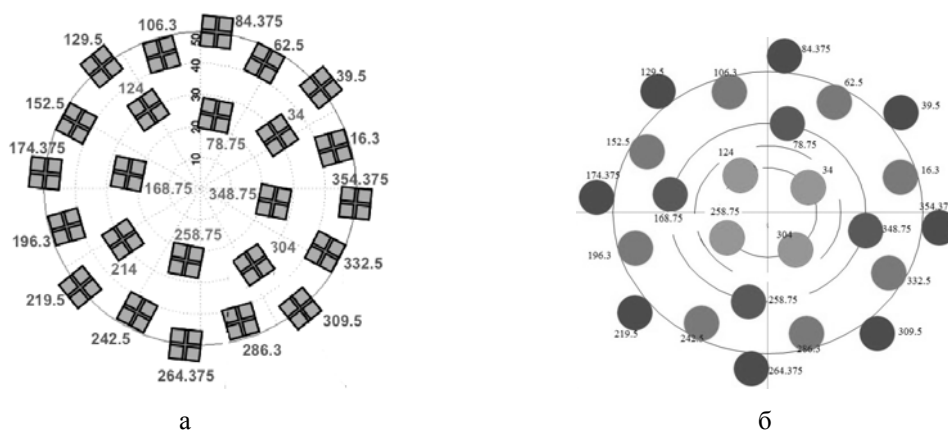


Рис. 6. Азимутальные углы для каждого пучка:
а – в экспериментах на установке NIF [11]; б – в трёхмерном расчете

Пучки ЛИ в сечении плоскостью параллельной основанию имеют форму эллипса. Для пятен засветки под углами $23,5^\circ$ и 30° вдоль оси хольраума лежит большая ось эллипсов, а у пятен засветки под углами $44,5^\circ$ и 50° вдоль оси хольраума лежит малая ось эллипсов. В табл. 1 приведены размеры эллипсов ЛИ и положения точек прицеливания (точек на поверхности бокса в которые попадают центры эллипсов входящих пучков ЛИ) по вертикальной оси.

Таблица 1

Размеры эллипсов ЛИ и положения точек прицеливания

Угол падения пучка ЛИ	Диаметр сечения пучка горизонтальной плоскостью, мм		Расстояние от центра бокса до точки прицеливания по вертикальной оси, мм
	в плоскости рис. 4	перпендикулярно плоскости рис. 4	
$23,5^\circ$	1,3761	1,764	0,9265
30°	1,3625	1,648	0,5285
$44,5^\circ$	1,0291	1,268	- 2,2977
50°	1,0672	1,186	- 2,6199

По методике МИМОЗА – НДЗД был проведен трехмерный расчет описанного выше опыта по непрямому облучению ДТ-капсулы, проведенного на установке NIF.

Система состояла из одной счетной области, содержащей 135 строк, 83 столбца и 160 листов, всего 1 792 800 точек.

В расчете учитывались следующие физические процессы: двухтемпературная газовая динамика с электронной и ионной теплопроводностью и электронно-ионной релаксацией; неравновесный и нестационарный спектральный перенос рентгеновского излучения в диффузионном приближении; энерговыделение лазерного излучения в лазерной короне; нестационарная и неравновесная кинетика ионизации плазмы в приближении среднего иона. Коэффициенты переноса, спектральные пробеги поглощения рентгеновского излучения, спектральная светимость плазмы и уравнения состояния вещества рассчитывались в приближении среднего иона [12].

На внешней границе счетной области были заданы граничные условия в виде свободной поверхности как по излучению, так и по газовой динамике. По электронной и ионной теплопроводности в качестве граничного условия использовалось условие равенства нулю потока тепла. Для излучения было введено ограничение пробега геометрическим размером бокса.

Коэффициент ограничения электронной теплопроводности был равен $f = 0,03$.

Разбиение диапазона спектра излучения на спектральные группы (26 групп) произведено следующим образом:

СПЕКТР 26 (0.0, 0.01, 0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 0.6, 0.8, 1., 1.25, 1.5, 2., 2.5, 2.75, 3., 3.25, 3.5, 4., 7., 10., 10.5, 11., 12., 12.5, 13., 15.)

Для расчета лазерного энерговыделения использовался метод лучевых траекторий, известный в литературе также под названием «ray tracing». Начальное поперечное распределение интенсивности лазерного пучка на внешней границе моделируемой системы разбивалось на множество отдельных лучей, каждому из которых присваивалась соответствующая доля энергии пучка. Затем на каждом временном шаге рассчитывалась траектория каждого луча внутри системы с учетом преломления и отражения от критических поверхностей.

Вся система с внешней стороны дополнялась слоем гелия, а с торцов она ограничивалась двумя плоскостями $X = \pm 80$ мкм. На этих плоскостях вычислялись координаты эллипсов – проекции от лазерных пучков. На каждой ограничивающей плоскости было сформировано 48 эллипсов-проекций. Затем на эллипсах были расставлены точки, для внешних эллипсов 81, а для внутренних – 281 точка. Энергия лазерного пучка распределялась по точкам соответствующего эллипса согласно приписываемой этой точке части площади эллипса. Таким образом были рассчитаны точки – источники лазерного излучения в расчете, всего получилось 7088 лучей. На рис. 7 представлена картина распределения источников лазерного излучения в расчете.

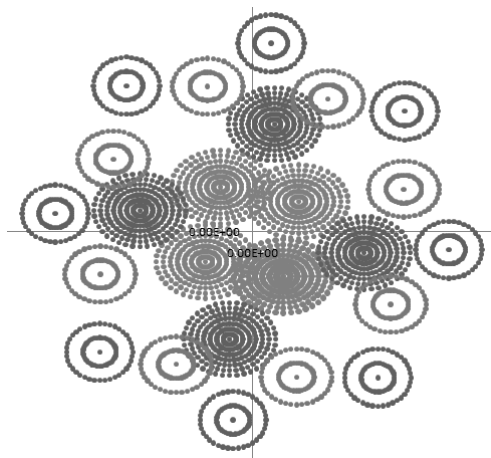


Рис. 7. Расположение источников ЛИ на плоскости $X = 80$ мкм

Начальное положение лучей определялось как множество точек эллипсов. Для получения энергии лазерного луча подсчитывалась интегральная величина в соответствии с площадью части эллипса, к которому приписывался данный луч.

В процессе счета использовался метод распараллеливания программ численной методики МИМОЗА-НДЗД, объединяющий 4 способа:

- метод трехмерной матричной декомпозиции,
- распараллеливание программы диффузии по группам спектра,
- мелко-блочное распараллеливание программы кинетики ионизации,
- распараллеливание программы закачки ЛИ.

В первых трех способах распараллеливания каждая точка закреплена за своим конкретным процессором. Что касается траектории лазерного луча, то её предсказать невозможно, луч неоднократно меняет процессор. При четвертом способе распараллеливания на каждом процессоре определяется количество лазерных лучей, их положение, затем рассчитываются траектории каждого луча до тех пор, пока ослабление из-за поглощения не составит величину 10^{-15} или все они не покинут параобласть. После того как все лучи покинут свои параобласти или ослабнут, определяется новое положение лучей и продолжается расчет до полного ослабления всех лучей или их выхода за пределы геометрии.

Трехмерный расчёт проводился до момента времени $t = 21,8$ нс. Несмотря на то, что входное отверстие закрывается разлетающейся *малоплотной* золотой плазмой, эта зона (рис. 8) всё же поглощает достаточно большое количество ЛИ. Поэтому было решено во внешней части рассматриваемой системы обнулять коэффициент тормозного поглощения, чтобы луч беспрепятственно достигал поверхности бокса.

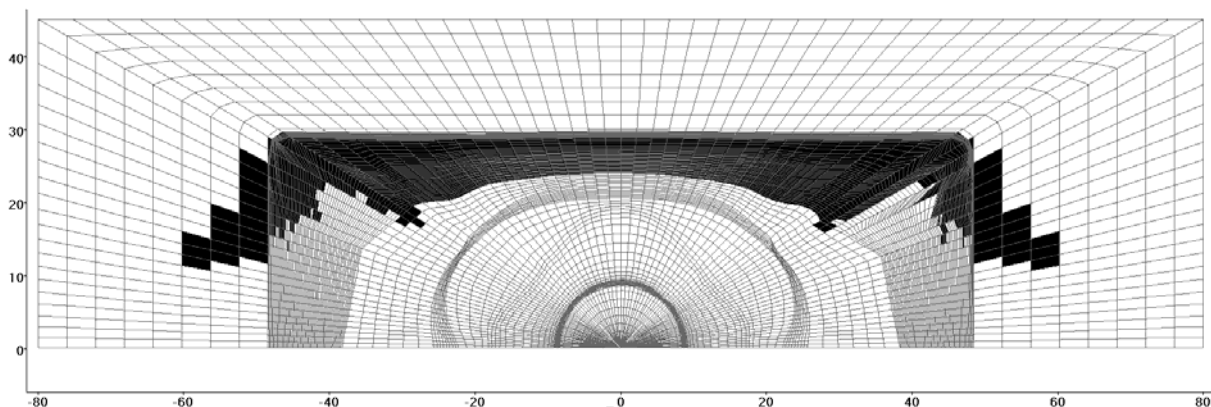


Рис. 8. Разлет золотой плазмы на момент времени $t = 15$ нс (лист № 80 $\varphi = 180^\circ$)

На рис. 9 приводится форма капсулы и распределение температуры ионов на момент достижения максимальной температуры ионов ($t = 20,07$ нс).

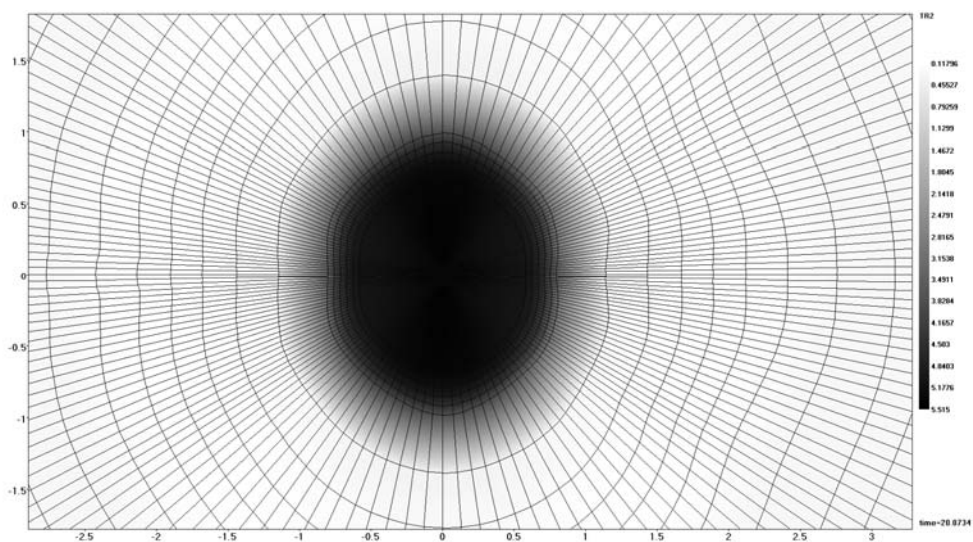


Рис. 9. Форма капсулы и распределение температуры ионов на момент достижения максимальной температуры ионов ($t = 20,07$ нс, лист № 2 $\varphi = 2,25^\circ$)

На рис. 10 показана форма капсулы и распределение температуры ионов на момент максимального сжатия ($t = 20,425$ нс).

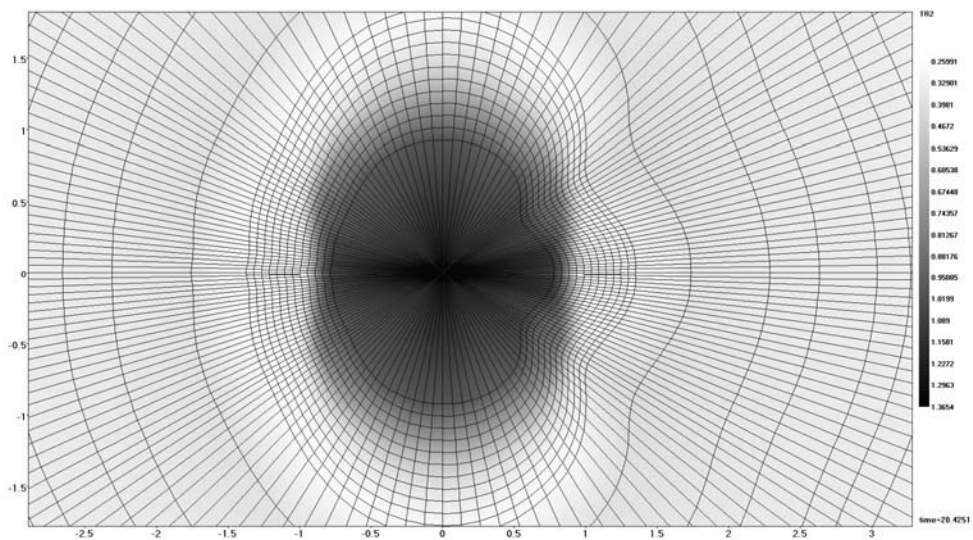


Рис. 10. Форма капсулы и распределение температуры ионов на момент максимального сжатия ($t = 20,425$ нс, лист № 2 $\varphi = 2,25^\circ$)

При выполнении данного расчета преследовалась цель получить значения ряда параметров работы мишени и сравнить полученные результаты с экспериментальными данными. На рис. 11 приводится сравнение временной зависимости температуры излучения в боксе-конвертере в сравнении с экспериментальным значением, восстановленным по показаниям спектрометра Dante [6] из опыта на установке NIF.

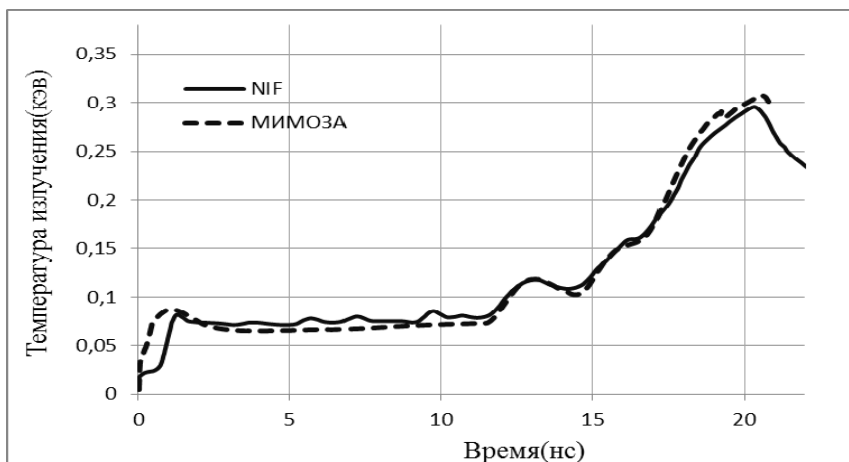


Рис. 11. Зависимость от времени температуры излучения в боксе-конверторе

Из рисунка видно хорошее совпадение полученной в расчете температуры рентгеновского излучения с температурой, измеренной в эксперименте. Наибольшее отличие в температурах наблюдается на интервалах времени от 0 до 2 нс и свыше 18 нс.

Полученная в расчетах завышенная температура РИ на интервале времени до 2 нс связана с тем, что при численном моделировании задачи не учитывалась тонкая пластиковая пленка, закрывающая отверстие ввода ЛИ в реальном эксперименте. Часть энергии ЛИ в опыте тратится на разлет этой пленки. Относительно различий в температуре РИ между расчётом и экспериментом после 18 нс нужно сказать следующее. Скорее всего, в трехмерном расчете повлиять на температуру РИ (в большую сторону) могла процедура обнуления коэффициента тормозного поглощения в разлетающейся плазме во внешней части рассматриваемой системы. В результате количество ЛИ, попадающего вовнутрь бокса, оказалось немного больше.

Литература

1. Miller G. H., Moses E. I., Wuest C. R. // Nucl. Fusion – 200444. – S. 228.
2. 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. Серия: Математическое моделирование физических процессов. – 1992. – Вып.1. – С. 59.
3. Волкова К. А., Гнутов А. С., Донцов С. А., Ульянов А. С. Расчетно-теоретическое исследование работы термоядерной мишени в эксперименте на установке NIF // XVII Международная конференция «Харитоновские тематические научные чтения»: сб. науч. тр. – Саров, 2016. – С. 323 – 326.
4. Бабанов А. В., Бельков С. А., Бондаренко С. В., Ватулин В. В., Винокуров О. А., Гречишкина И. Н., Змушко В. В., Измайлова Т. Б., Митрофанов Е. И., Рябикина Н. А., Шамраев Б. Н. Методика МИМОЗА-НДЗД. Расчет трехмерных задач спектрального переноса излучения // Вопросы атомной науки и техники. Серия: Математическое моделирование физических процессов. – 2012. – Вып. 2. – С. 64 – 72.
5. Edwards M. J. et al. // Phys.Plasmas – 2011. – 18. – 051003.
6. Glenzer S. H. et al. Cryogenic thermonuclear fuel implosions on the National Ignition Facility // Phys.Plasmas. – 2012. – 19. – 056318.
7. Callahan D. A. et al. The velocity campaign for ignition on NIF // Phys.Plasmas. – 2012. – 19. – 056305.
8. Casey D. T. et al. Development of the CD Symcap platform to study gas-shell mix in implosions at the National Ignition Facility // Phys.Plasmas. – 2014. – 21. – 092705.

9. Smalyuk V. A. et al. Experimental results of radiation-driven, layered deuterium-tritium implosions with adiabat-shaped drives at the National Ignition Facility // Phys.Plasmas. – 2016. – 23. – 102703.
10. Haan S. W. et al. Point design targets, specifications, and requirements for the 2010 ignition campaign on the National Ignition Facility // Phys.Plasmas. – 2011. – 18. – 051001.
11. Michel et al. // Phys.Plasmas. – 2013. – 20. – 056308.
12. Софронов И. Д., Бельков С. А., Винокуров О. А., Мхитарьян Л. С., Рябикина Н. А. Методика расчета спектрального переноса излучения в двумерном комплексе МИМОЗА-НД // Вопросы атомной науки и техники. Серия: Математическое моделирование физических процессов. – 2000. – Вып. 1 – 8.

**3D COMPUTATION OF THE EXPERIMENT AT NIF FACILITY:
A SCHEME OF INTRODUCE LASER RADIATION
INTO THE HOHLRAUM AND COMPRESSION
OF AN ICF TARGET**

*A. S. Gnutov, S. A. Dontsov, D. M. Linnik, L. F. Potapkina,
P. V. Rybachenko*

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

This paper describes program realization for numerical simulation of implosion process for a thermonuclear target under operation condition at National Ignition Facility (NIF), the results of 3D computations in a shock-capturing approach are provided, as well as comparison with available experimental results.

Key words: laser target, hohlraum, laser radiation, spectral radiation transfer, parallel computations.

УДК 519.6

**ВЕКТОРИЗОВАННЫЕ АЛГОРИТМЫ ДЛЯ ОДНОЙ РАЗНОСТНОЙ СХЕМЫ
ГАЗОВОЙ ДИНАМИКИ НА НЕСТРУКТУРИРОВАННЫХ МНОГОГРАННЫХ
СЕТКАХ
В ЛАГРАНЖЕВОЙ МЕТОДИКЕ ТИМ-3D**

Ф. О. Голомидов, А. А. Воротинов

Российский федеральный ядерный центр –
Всероссийский НИИ экспериментальной физики, Саров

В данной работе описываются векторизованные алгоритмы для расчета уравнений газовой динамики на неструктурированной многогранной сетке произвольного вида, используемой в методике ТИМ-3D. Приводится описание одной из разностных схем, реализованных в методике на основе лагранжевого подхода, и реализующие ее традиционные скалярные алгоритмы.