

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

### THREE-DIMENSIONAL SIMULATION OF EXPERIMENT ON THE NATIONAL IGNITION FACILITY: INSERTION OF LASER BEAMS AND COMPRESSION OF THERMONUCLEAR TARGET

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

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

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

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

Представлены результаты трехмерного расчета конверсии лазерного излучения в рентгеновское в боксе-конвертере для опыта N11215 (low-foot), проведенного на установке NIF. Получены характеристики поля рентгеновского излучения в мишени и динамика сжатия термоядерной капсулы.

The paper presents the results of three-dimensional numerical simulation of laser conversion into X-ray inside cylindrical hohlraum for N11215 (low-foot) shot at the National Ignition Facility. X-ray field distribution and thermonuclear capsule implosion dynamic were obtained.

В данной работе рассматривается программная реализация, требуемая для численного моделирования процесса обжатия термоядерной мишени для условий работы установки National Ignition Facility (NIF) [1], приведены результаты трехмерного расчета в сквозной постановке, проведено сравнение доступными экспериментальными результатами.

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 расчеты 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 расчетные исследования обжатия термоядерной ми-

шени в сквозной постановке [3]. Однако для более полного и точного описания процессов, происходящих в термоядерной мишени, требуется проведение полноценных 3-х мерных расчетов.

Трехмерная 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. Методика позволяет рассчитывать следующие физические процессы: поглощение и рассеяние лазерного излучения в короне, электронная и ионная теплопроводность, спектральный перенос рентгеновского излучения, перенос энергии  $\alpha$ -частицами, возникающими в термоядерных реакциях.

В данной работе представлены результаты трехмерного расчета 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-конвертера (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.

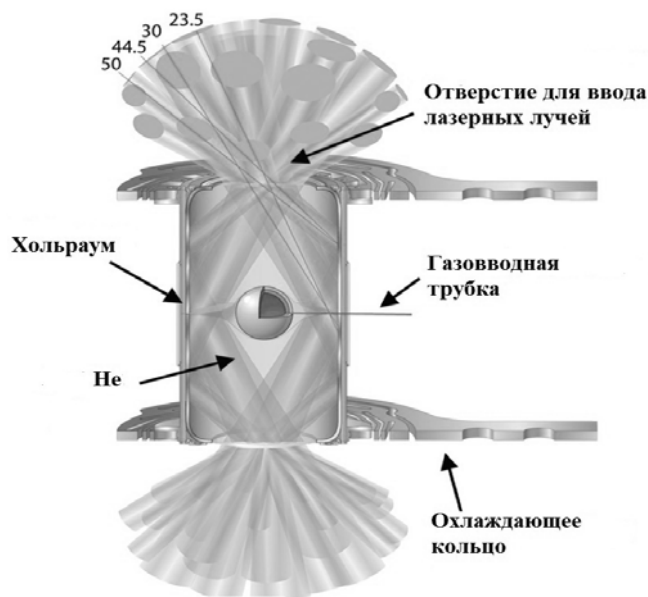


Рис. 1. Схема проведения опыта на установке NIF [5]

Лазерная установка NIF построена в Ливерморской национальной лаборатории (США) в 2009 году. 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 N111215 [6] из серии «low-foot». Для выбранного эксперимента в открытых источниках имеется достаточно информации для полноценной постановки расчета.

Выстрел N111215 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 мг/см<sup>3</sup>. В центре обоих торцов цилиндра имеются отверстия для ввода ЛИ, в эксперименте N111215 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 мг/см<sup>3</sup>. Разрез капсулы схематично представлен на рис. 2.

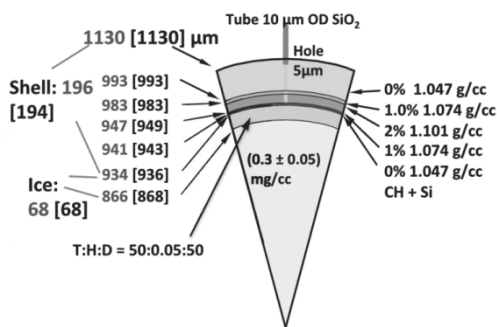


Рис. 2. Разрез термоядерной капсулы для выстрела N111215 на установке NIF [6]

Через каждое из входных отверстий внутренняя поверхность бокса облучается пучками лазерного излучения (ЛИ), которые входят в бокс под углами примерно 50°; 45,5°; 30° и 23,5°. 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° (4 пучка) составляют внешнее кольцо засветки, а пучки, входящие под углами 30° (8 пучков) и 23,5° (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] и представлена на рис. 3 в логарифмическом масштабе. Положения пятен лазерной засветки на поверхности бокса и размеры пучков ЛИ взяты из работы [10]. Схема ввода лучей в 575-хольраум представлена на рис. 4.

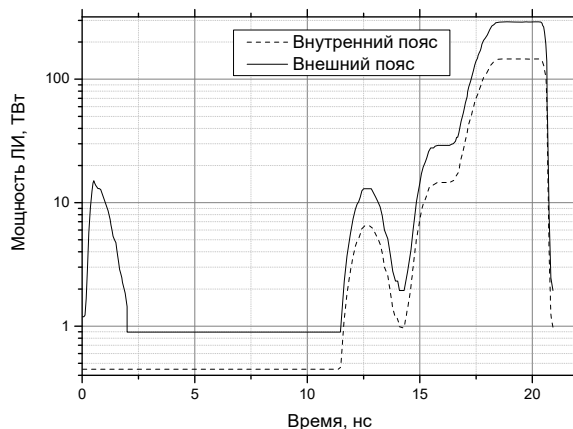


Рис. 3. Временная зависимость мощности лазерного импульса

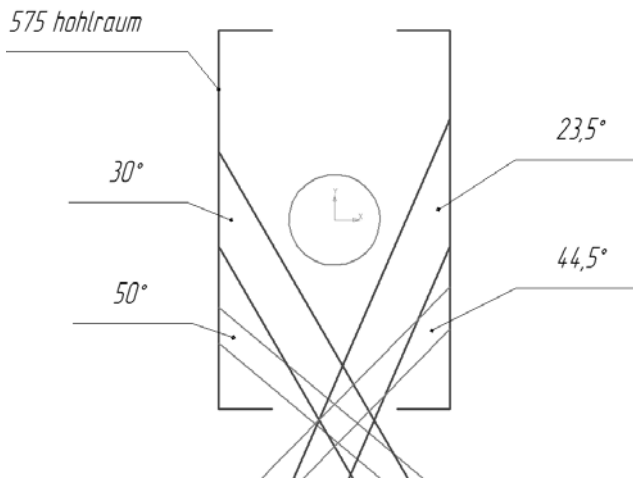


Рис. 4. Схема ввода лазерного излучения в бокс-конвертор в опытах на установке NIF

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

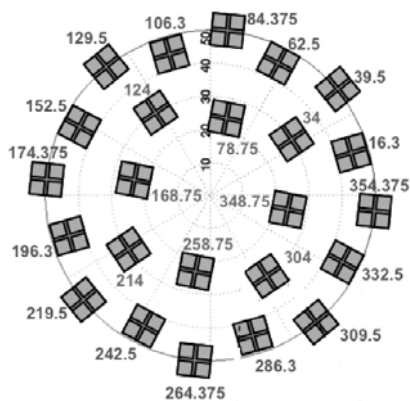


Рис. 5. Азимутальные углы для каждого пучка [11]

Начальное распределение интенсивности лазерного пучка на внешней границе моделируемой системы 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 рефракции и отражения от критических поверхностей, если таковые имеются в системе. Одновременно с траекторией рассчитывается коэффициент ослабления луча вдоль его траектории из-за обратнотормозного поглощения. В каждой ячейке лазерный луч теряет некоторую долю своей энергии, которая передается во внутреннюю энергию электронов.

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

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°	1,3761	1,764	0,9265
30°	1,3625	1,648	0,5285
44,5°	1,0291	1,268	-2,2977
50°	1,0672	1,186	-2,6199

В представленном расчете внутренняя полость бокса-конвертора была заполнена гелием с плотностью 0,96 мг/см<sup>3</sup>. Для того чтобы задать источники ЛИ, вся система с внешней стороны дополнялась слоем гелия, а с торцов она ограничивалась двумя плоскостями  $X = \pm 80$  мкм. На этих плоскостях задавались источники ЛИ. На каждой из плоскостей задавались 48 эллипсов, в которых располагалось по 3544 источника ЛИ. Таким образом, всего в расчете было 7088 лазерных лучей. На рис. 6 представлено расположение лазерных источников на плоскости  $X = 80$  мкм.

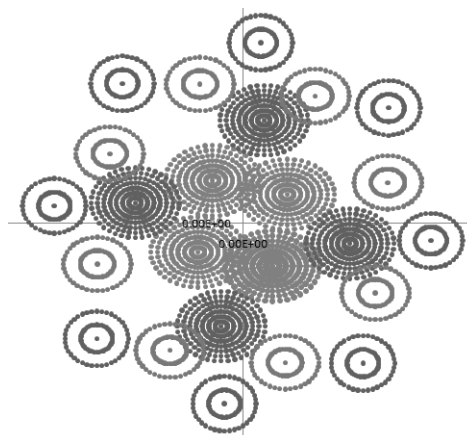


Рис. 6. Расположение источников ЛИ на плоскости  $X = 80$  мкм

Пучки ЛИ попарно образуют два кольца засветки «внешнее» и «внутреннее». На рис. 7 представлен общий вид интенсивности засветки, на рис. 8 представлена азимутальная развертка с положением лазерных пятен.

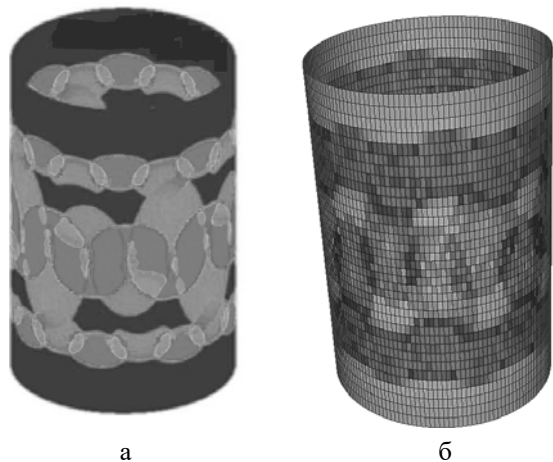


Рис. 7. Общий вид интенсивности засветки: в экспериментах на установке NIF (а), в трехмерном расчете (б)

Трехмерный расчет проводился до момента времени  $t = 21,8$  нс. Несмотря на то, что входное отверстие закрывается разлетающейся *малоплотной* золотой плазмой, эта зона (рис. 9) все же

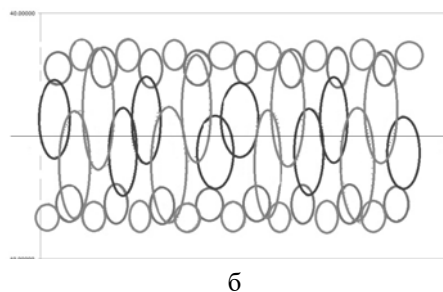
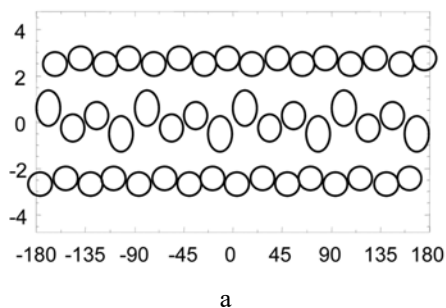


Рис. 8. Азимутальная развертка с положением лазерных пятен: в экспериментах на установке NIF (а), в трехмерном расчете (б)

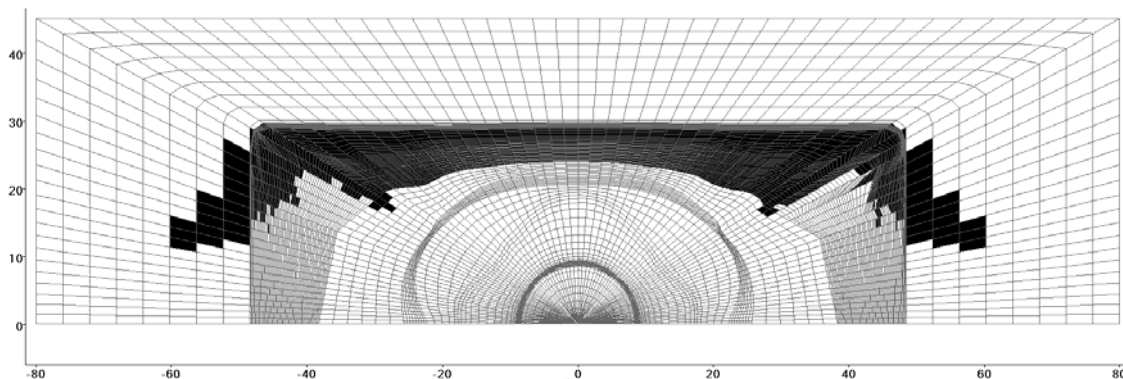


Рис. 9. Разлет золотой плазмы на момент времени  $t = 15$  нс (лист № 80  $\varphi = 180^\circ$ )

поглощает достаточно большое количество ЛИ. Поэтому было решено во внешней части рассматриваемой системы обнулять коэффициент тормозного поглощения, чтобы луч беспрепятственно достигал поверхности бокса.

На рис. 10 приводится форма капсулы и распределение температуры ионов на момент достижения максимальной температуры ионов ( $t = 20,07$  нс).

На рис. 11 приводится форма капсулы и распределение температуры ионов на момент максимального сжатия ( $t = 20,425$  нс).

При выполнении данного расчета преследовалась цель получить значения ряда параметров работы мишени и сравнить полученные результаты с экспериментальными данными. На рис. 12 приводится сравнение временной зависимости температуры излучения в боксе-конвертере в сравнении с экспериментальным значением, восстановленным по показаниям спектрометра Dante [12] из опыта на установке NIF.

Из приведенного 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.

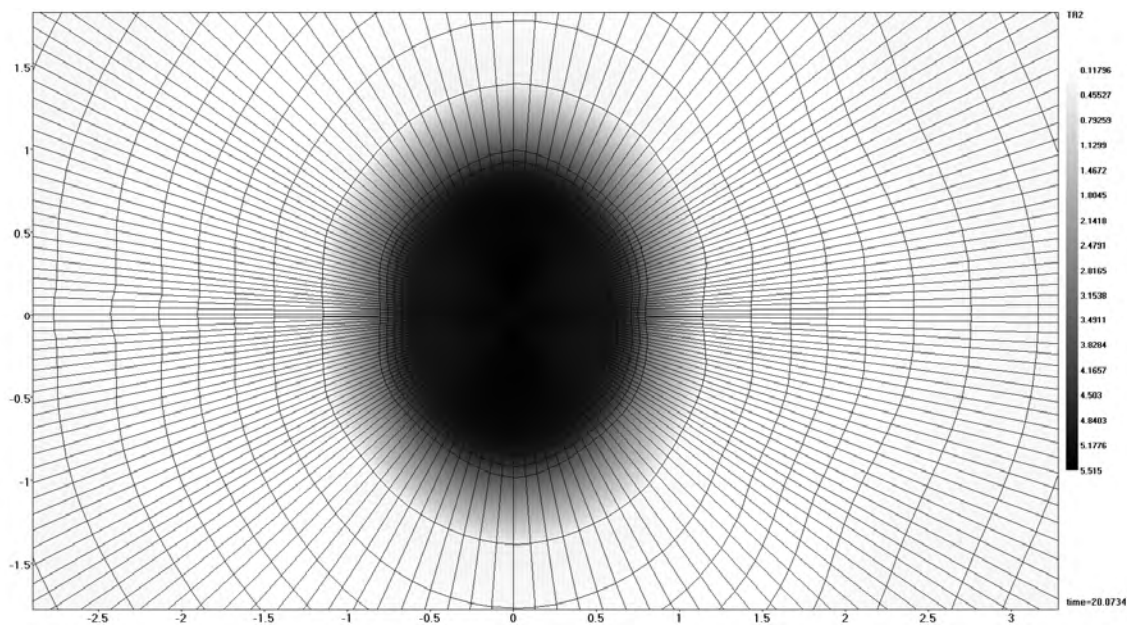


Рис. 10. Форма капсулы и распределение температуры ионов на момент достижения максимальной температуры ионов ( $t = 20,07$  нс, лист № 2  $\varphi = 2,25^\circ$ )

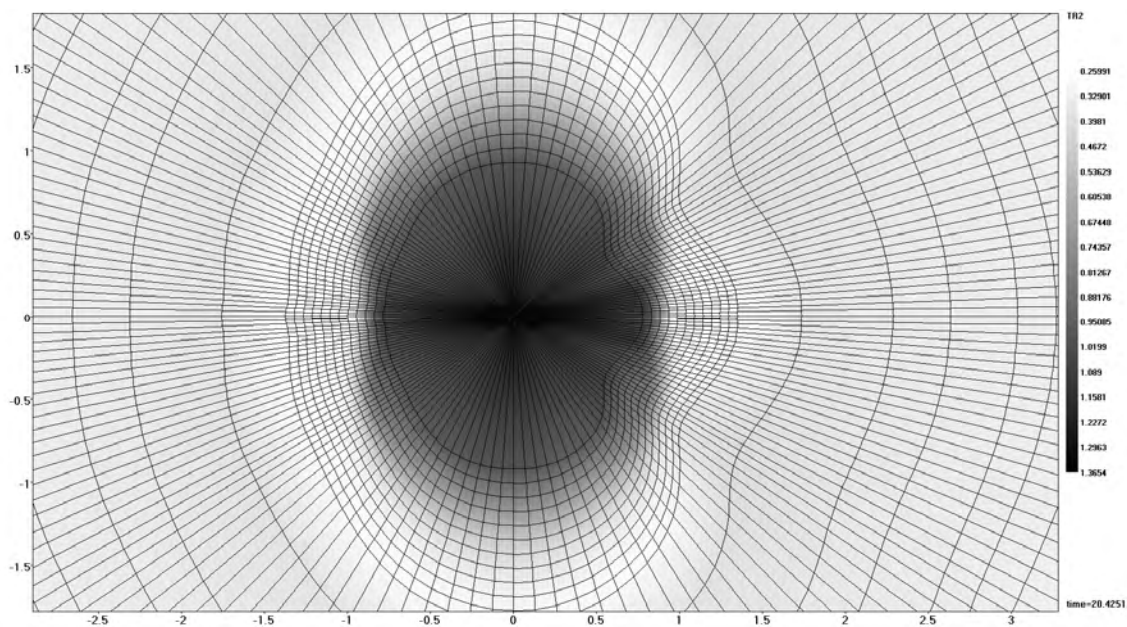


Рис. 11. Форма капсулы и распределение температуры ионов на момент максимального сжатия ( $t = 20,425$  нс, лист № 2  $\varphi = 2,25^\circ$ )

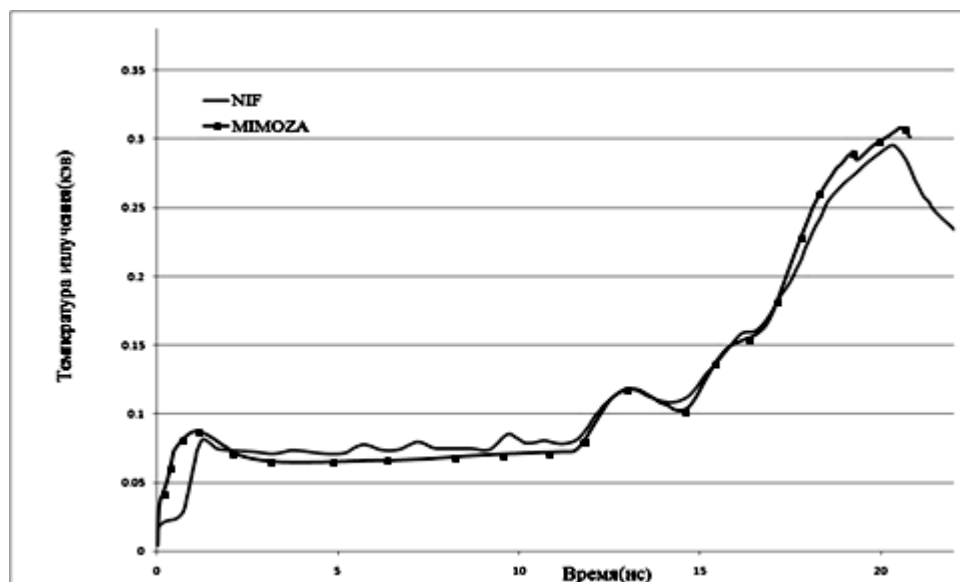


Рис. 12. Зависимость от времени температуры излучения в боксе-конверторе

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 расчетом и экспериментом после 18 нс нужно сказать следующее. Скорее всего, в трехмерном расчете повлияет 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.

### Список литературы

1. Miller G. H., Moses E. I., Wuest C. R. // Nucl. Fusion 44, S228 (2004).
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. Сер. 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 // Труды международной конференции XVII Харитоновские тематические научные чтения. 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. Сер. 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. Dewald et al. Dante soft X-ray power diagnostic for National Ignition Facility // Review of scientific instruments. 2004. 75, 3759.