

IMAGE RECONSTRUCTION OF DEPTH INHOMOGENEITIES IN EARTH MEDIUM FROM SEISMIC DATA («SEISMIC MIGRATION»)

*A. L. Pleshkevich¹, D. M. Vishnevsky², A. V. Ivanov³, V. D. Levchenko³,
V. V. Lisitsa², B. P. Moroz¹*

¹JSC Central Geophysical Expedition / Rosgeo, Moscow

²Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics of SB RAS, Novosibirsk

³Keldysh Institute of Applied Mathematics of RAS, Moscow

Based on downward wave continuation a mathematical formulation and numerical methods are discussed for solving the highly important problem of reconstructing a 3D seismic image of inhomogeneous earth medium in gas and oil prospecting, traditionally called as «seismic migration». The input data are the results of registration of the reflected and scattered seismic waves from the depth earth inhomogeneities, generated by point sources and recorded by receivers located at the nodes of a quasi-regular dense grid on the surface. The total volume of digital seismic data set ranges from 10^2 GB to 10^4 GB. A general formula for solving the problem in the form of a multiple integral over the coordinates of sources and receivers is obtained, containing the product of the Fourier transform over the reversed time of the recorded wave field and normal derivatives of Green functions for sources and receivers. The methods for calculating Green's functions are presented, based on a new asymptotic solution in the ray parametric coordinates and on a new high-order approximation of pseudospectral solution of the «one-way» pseudodifferential wave equation, which were used to develop the corresponding computational programs. Intensive supercomputer calculations for seismic migration are parallel implemented on clusters of classical or hybrid architectures using GPU computing accelerators. Practical examples of seismic migration results obtained on supercomputers Lomonosov (Moscow State University) and RFNC-VNIIEF are given.

Keywords: Green function, multipath asymptotic approximation, pseudospectral scheme, depth seismic migration.

УДК 52-626

ОЦЕНКА ВОЗМОЖНОСТИ ЗАЖИГАНИЯ ДТ-КАПСУЛЫ В СКВОЗНЫХ РАСЧЕТАХ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ИЗЛУЧЕНИЯ В ЦИЛИНДРИЧЕСКОМ БОКСЕ-КОНВЕРТОРЕ В УСЛОВИЯХ РАБОТЫ ЛАЗЕРНО-ФИЗИЧЕСКИХ УСТАНОВОК

В. Ю. Резчиков, В. Ю. Морозов, А. А. Бусалов, Н. А. Вершинина

Российский федеральный ядерный центр-
Всероссийский НИИ экспериментальной физики, Саров

В докладе приведены результаты первых расчетов по комплексу программ ЛАСМ сжатия и неравновесного горения криогенной капсулы, содержащей термоядерное топливо, в полной сквозной постановке. В качестве начальной постановки выбрана редакция опыта Low-foot № 111215 для лазерно-физической установки NIF [1]. Моделируемые физические процессы, учиты-

ваемые в расчетах, гарантированно обеспечивают расчетное зажигание и горение идеальных сферически-симметричных систем, содержащих ДТ-топливо. По результатам расчетов детально проанализированы процессы распространения излучения в полости бокса, рассмотрен механизм влияния полиамидной мембраны, закрывающей входное отверстие.

Ключевые слова: лазерный термоядерный синтез, ДТ-капсула, рентгеновское излучение, бокс-конвертор.

Инерциальный термоядерный синтез

Решение проблемы управляемого термоядерного синтеза, возможно, уже в недалеком будущем позволит получить чистый, безопасный и практически неисчерпаемый источник энергии. Но трудности, лежащие на пути к демонстрации научной осуществимости этого процесса, связанные как с иницированием термоядерных реакций, так и с управлением термоядерным горением, являются поистине огромными. Так как ограниченность ресурсов традиционных видов топлива на Земле становится все более очевидной, ученые обратили внимание на звезды, как на новый возможный источник энергии. Известно, что основным источником энергии в звездах является энергия термоядерного синтеза. В земных условиях термоядерный синтез удалось осуществить лишь в процессе работы термоядерного оружия.

При очень высоких температурах в таких реакциях происходит слияние ядер легких элементов. В результате этого при образовании более тяжелых ядер высвобождается энергия связи. Примером такого взаимодействия может служить синтез двух тяжелых изотопов водорода – дейтерия D и трития T, в процессе которого образуется ядро гелия и нейтрон. Энергия этой реакции – 17,6 МэВ выделяется в виде кинетической энергии продуктов синтеза.

Суть ИТС заключается в следующем: с помощью лазерного излучения или интенсивных пучков заряженных частиц проводят быстрое сжатие микроскопических капель термоядерного топлива до огромных значений плотности и температуры, требуемых для эффективного термоядерного горения вещества. Если сжать топливо до достаточной плотности, то оно будет гореть настолько быстро, что высвобождение большей части энергии произойдет раньше его разлета, т. е. на время своего горения плазма удерживается вследствие своей инерции [2].

Крупнейший в мире научный комплекс, построенный в 2009 году для осуществления инерциального термоядерного синтеза, – установка NIF – Национальный комплекс лазерных термоядерных реакций. Находится в Ливерморской национальной лаборатории им. Лоуренса (штат Калифорния, США). Пиковая мощность 1,8 МДж. Предполагается, что установка аналогичного класса будет построена и в России.

Приложение синтеза с инерциальным удержанием можно разделить на несколько направлений: производство энергии, военные разработки, исследование фундаментальных законов физики.

Проблемы технического характера, которые встают на пути осуществления «брейквивена»: технология создания драйверов и топливных мишеней, синтез ДТ топлива в промышленных масштабах, низкое КПД оборудования (неодимовый лазер 2 %) и т. д. К естественным проблемам можно отнести: образование быстрых электронов, воздействие интенсивных магнитных полей, турбулентное перемешивание и т. д.

Комплекс ЛАСМ

В настоящее время, эксплуатируется и постоянно совершенствуется многомерный программный код ЛАСМ, предназначенный для численного моделирования физических процессов, происходящих в высокоэнергетичной плазме, создаваемой в условиях экспериментов на современных лазерно-физических установках (ЛФУ). Основное предназначение кода – проверка предсказательных теорий, прогнозирование экспериментов, отработка конструкций сферических и цилиндрических

боксов и мишеней с варьированием их геометрических размеров, разнотолщинностей, составов и физических свойств.

На текущий момент по комплексу ЛАСМ мы можем одновременно моделировать следующие физические процессы:

- лазерное энерговыделение
- распространение излучения в многогрупповом кинетическом приближении
- электронная (с коэффициентом ограничения по потоку) и ионная теплопроводности с электронно-ионной релаксацией
- неравновесная газовая динамика
- термоядерная кинетика и энерговыделение
- перенос нейтронов в многогрупповом кинетическом приближении
- перенос быстрых заряженных частиц
- учет неравновесной кинетики ионизации вещества в приближении «среднего иона» [3].

В комплексе ЛАСМ использованы модели переноса лазерного излучения и его поглощения. (физические принципы модели описаны в [4–6]) Реализована возможность расчета УРСов и пробегов по модели «среднего иона». Размерности, с которыми работает комплекс: по пространству 100 мкм, по времени 1 нс.

Модель лазерного излучения

Немного подробнее затронем модель лазерного излучения которая реализована в нашем комплексе. Модель расчета и поглощения энергии лазерного излучения (ЛИ), включает в себя модель распространения ЛИ согласно законам геометрической оптики и поглощения энергии ЛИ по обратнo-тормозному механизму. В рамках геометрической оптики траектория светового луча определяется пространственным распределением показателя преломления:

$$n = \frac{1}{\sqrt{2}} \left[\left(\varepsilon'^2 + \varepsilon''^2 \right)^{1/2} + \varepsilon'^2 \right]^{1/2}, \quad (1)$$

а доля поглощенной энергии на единице длины его пути – коэффициентом поглощения:

$$k_a = \frac{\omega_0}{\sqrt{2}c} \left[\left(\varepsilon'^2 + \varepsilon''^2 \right)^{1/2} - \varepsilon'^2 \right]^{1/2}. \quad (2)$$

Эти оптические характеристики выражаются через действительную и мнимую часть диэлектрической проницаемости среды:

$$\varepsilon = \varepsilon' + i\varepsilon'', \quad \varepsilon' = 1 - \frac{\rho}{\rho_c}, \quad \varepsilon'' = \frac{\rho}{\rho_c} \frac{\nu_e}{\omega_0} \quad (3)$$

Для распространения оптического излучения доступна лишь область докритической ($\rho < \rho_c$) плазмы:

$$\rho_c = 1,87 \cdot 10^{-3} \frac{A}{Z\lambda_0^2}, \quad (4)$$

где ρ – плотность, A – атомный вес, Z – степень ионизации (заряд иона), ν_e – эффективная частота столкновений, ω_0 – частота и λ_0 – длина волны (в мкм) лазерного излучения в вакууме, c – скорость света в вакууме.

Сквозные двумерные расчеты

В этом разделе будут представлены первые результаты сквозных расчетов сжатия и энерговыделения ДТ-капсулы в условиях эксперимента на ЛФУ NIF на примере опыта Low-foot № 111215. Для наглядности представим трехмерную модель хольраума (рис. 1).

Полусфера которая располагается в центре системы – криогенная капсула с DT топливом. Внешний цилиндр с отверстиями на торцах это бокс-конвертор, предназначенный для преобразования лазерного излучения в рентгеновское.

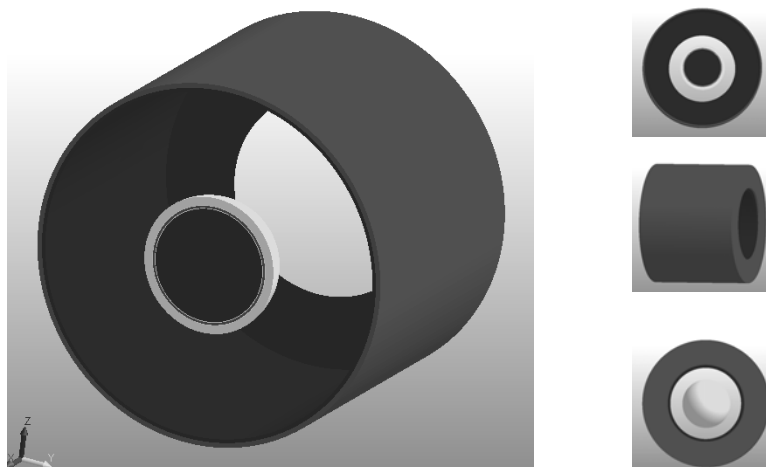


Рис. 1. Трехмерная модель Хольраума

Двумерная постановка

В табл. 1 приведен вещественный состав, на рис. 2 представлена двумерная модель системы. В центре располагается криогенная капсула состоящая из двух слоев DT топлива: газ и лед. Топливная смесь размещается внутри пятислойного аблятора. В составе пластика имеется незначительная примесь кремния. Снаружи располагается цилиндрический бокс-конвертор, который выполнен из полиэтилена, его внутренняя поверхность покрыта слоем золота. На торце цилиндра располагается отверстие для ввода лазерного излучения. Входное отверстие закрыто пленкой из полиамида. Внутренняя полость бокса заполнена гелием. Состав и размеры капсулы приведены в табл. 1. Геометрические размеры бокса: длина 9,4 мм, 2,875 мм радиус. Толщина стенки бокса составляла 50 мкм.

Таблица 1

Состав 0	ρ [г/см ³]	R [100 мкм]
Газ	0,0003	8,66
лед	0,25	9,34
CHO (Si 0%)	1,047	9,41
CHO (Si 1%)	1,074	9,47
CHO (Si 2%)	1,101	9,83
CHO (Si 1%)	1,074	9,93
CHO (Si 0%)	1,047	11,3
He	0,00096	
Au	19,3	
CH	1,2	
CH	1	
He	0,0001	

Состав

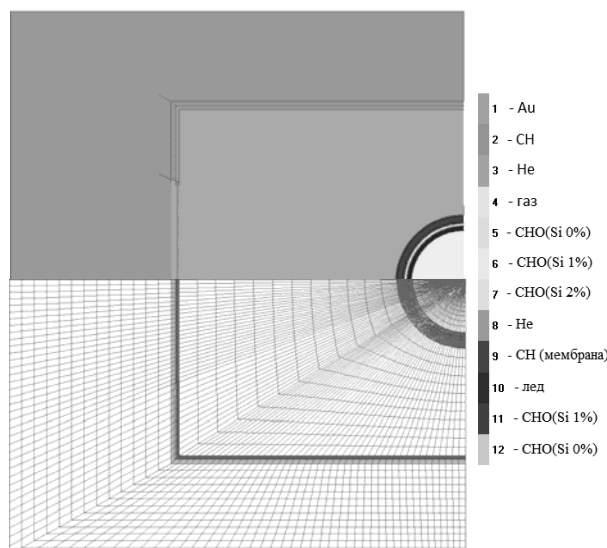


Рис. 2. Двумерная модель задачи

Лазерный источник

На рис. 3 представлено пространственное распределение лазерного источника. В трехмерном случае система состоит из 48 лазерных источников, по 24 источника слева и справа от капсулы. Постановка нашего расчета является осесимметричной, с учетом симметрии относительно вертикальной плоскости. Для описания источника в этом случае достаточно задать 4 лазерных пучка.

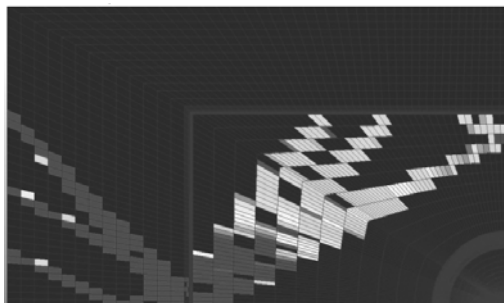


Рис. 3. Схема засветки ЛИ

На рис. 3 траектория лазерных пучков с момента проникновения в систему до момента первого контакта с золотыми ячейками бокса конвертора. По изображению можно проконтролировать зеркальное отражение от оси и плоскости симметрии расчета.

На рис. 4 представлена полная траектория четырех лучей лазерного излучения в системе. По изображению можно визуальнo оценить всю сложность траектории лучей с момента проникновения лазерного излучения в счетную область до выхода лучей из системы. Отметим большое количество отражений каждого луча

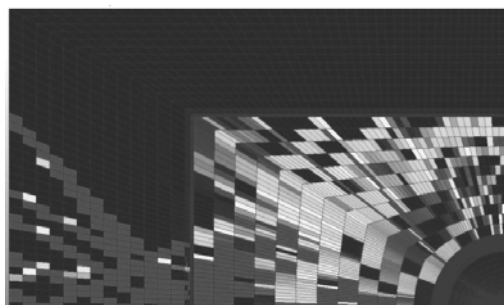


Рис. 4. Схема засветки ЛИ с отражениями

Для полного расчета использовались пучки, состоящие из 100 лучей. При такой детализации описания лазерного излучения вся внутренняя область бокса засвечивается (рис. 5).

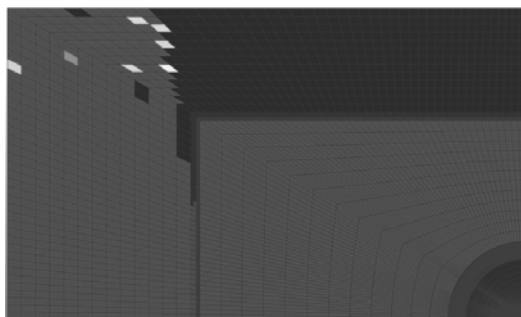


Рис. 5. Схема засветки ЛИ (четыре источника по 100 лучей)

Полная энергия лазерного импульса 1,5 Мдж, длительность импульса 22 нс. На рис. 6 представлено распределение доли интенсивности ЛИ от времени. Длина волны ЛИ: 0,351 мкм – третья гармоника неодимового лазера.

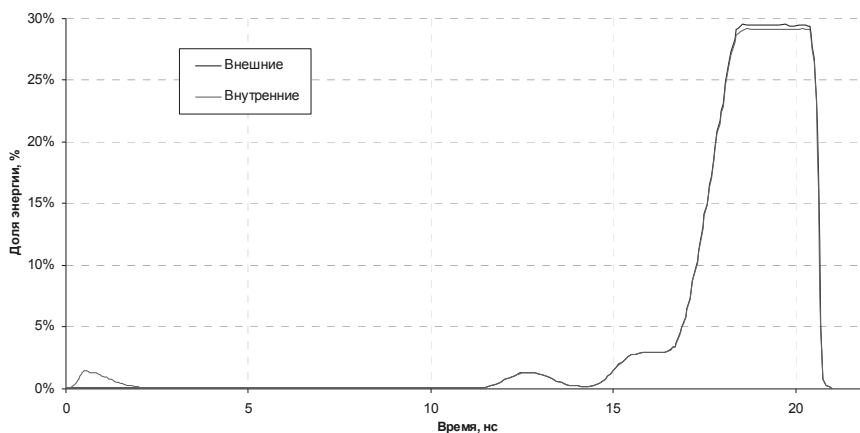


Рис. 6. Распределение доли интенсивности ЛИ от времени

В табл. 2 приведены координаты источников (пучков) ЛИ. В табл. 3 представлена энергетика лазерного излучения.

Таблица 2

Координаты источников ЛИ

Номер пучка	X, 100 мкм	Y, 100 мкм	направление
1	- 75,0	29,4	50
2		28,54	44,5
3		17,59	30
4		7,89	23,5

Таблица 3

Энергетика источников ЛИ

	Пучки 1,2	Пучки 3,4
Энергия пучков	1000 кДж	500 кДж
Полная энергия	1500 кДж	

Результаты двумерных расчетов

На графиках представлены временные зависимости температуры излучения (ТГ, рис. 7) и давления (Р, рис. 8) на поверхности полимерной оболочки мишени в трех контрольных точках: экватор (сверху), среднее направление (45 градусов) и юг (слева)

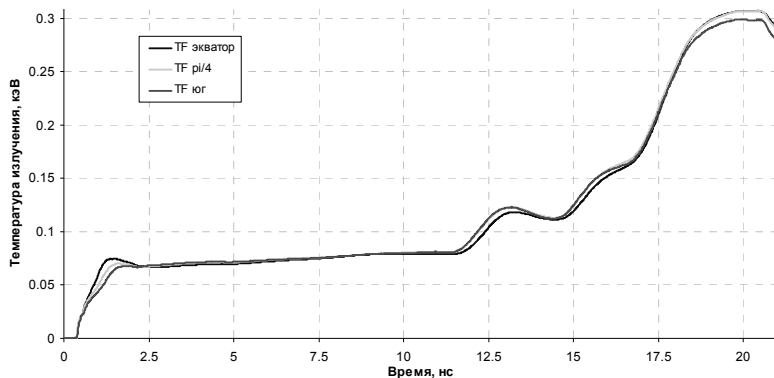


Рис. 7. Температура излучения на поверхности капсулы в контрольных точках от времени

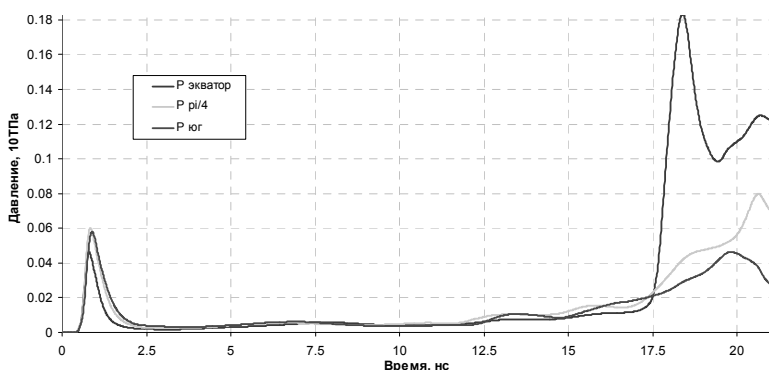


Рис. 8. Давление на поверхности капсулы в контрольных точках от времени

Отличия в температуре излучения на выбранных направлениях не превышают 3 % на всем протяжении расчета, что может трактоваться как весьма хороший результат.

На приведенном же графике давлений заметны существенные неоднородности, которые требуют пояснений. Первый скачок давлений (~ 1 нс) объясняется заполнением бокса рентгеновским излучением и началом прогрева аблятора капсулы. Второй пик давления (на экваторе максимум достигает 1,8 ТПа) объясняется возникновением ситуации, когда разлетевшаяся оболочка капсулы практически соприкасается с разлетевшейся стенкой бокса.

Влияние полиамидной мембраны

Полиамидная мембрана располагается на входном отверстии бокса конвертора и используется для удержания гелия(He) внутри бокса до момента начала импульса ЛИ. Мембрана это тонкая пленка(5 мкм) из полимерного материала (СН), при этом она не является прозрачной для ЛИ. На первом этапе происходит нагрев мембраны, а затем испарение, после чего лазерный импульс может проникнуть внутрь бокса конвертора.

Оценим влияние мембраны на обжатию криогенной капсулы. Результаты проведенных расчетов показали, что присутствие мембраны в системе незначительно уменьшает давления и температуры на поверхности капсулы, что ожидаемо. Также хотелось бы обратить внимание на особенность начального прогрева капсулы: за счет поглощения ЛИ на начальном этапе расчета и его переизлучения в виде рентгена мы видим небольшой «уступ» на графике температур излучения 7 эВ (рис. 9). Он более всего выражен на юге капсулы и отсутствует на экваторе системы.

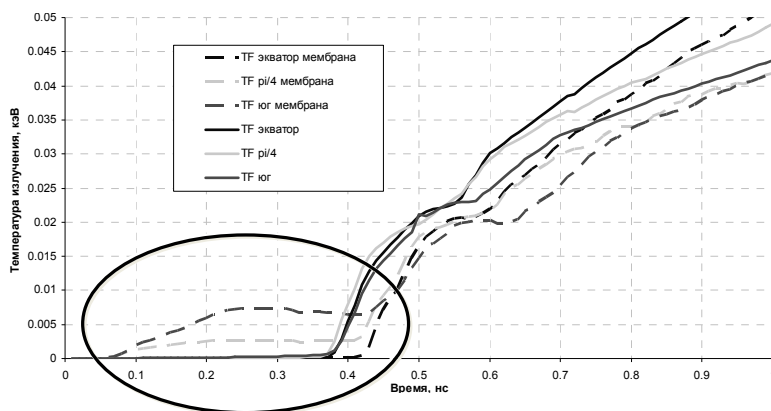


Рис. 9. Температура излучения на поверхности капсулы в контрольных точках от времени

Оценка возможности зажигания ДТ-капсулы

На рис. 10 можно увидеть состояние системы вблизи момента максимального сжатия 20,5 нс. Полученное сжатие имеет существенно не одномерный характер.

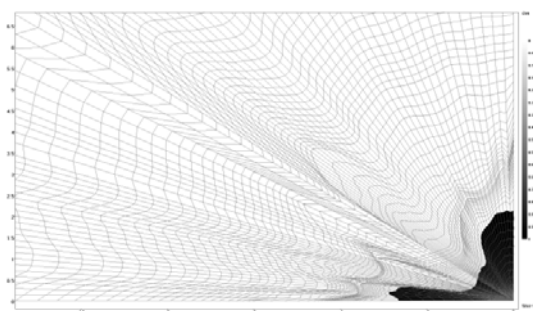


Рис. 10. Пространственное распределение ДТ топлива в расчете на момент 20,5 нс

Зажигание мишени определяется исключительно способностью к горению ДТ-газа. Основоплагающими критериями для получения зажигания термоядерного топлива (см., например, [2]) является одновременное сочетание определяющих величин: поверхностной плотности ρR ($> 0,3\text{г/см}^2$), плотности (200г/см^3) и температуры ($5 - 10\text{кэВ}$).

Средняя температура ионов ДТ топлива в нашем расчете составила $\sim 1\text{кэВ}$, максимальное значение плотности $\sim 35\text{г/см}^3$. Таким образом, у нас в расчете не реализовались необходимые условия зажигания и по температуре и по плотности ДТ смеси. Тем не менее, мы смогли численно промоделировать обжатие ДТ капсулы сквозным образом в двумерной постановке задачи. Также мы смогли получить характеристики ДТ «тления». Горением такие значения назвать трудно – табл. 4. Кроме того по результатам проведенных расчетов мы смогли накопить граничные условия на поверхности капсулы. Это позволило нам в дальнейшем провести расчет обжатия одной ДТ капсулы, но уже в одномерной постановке.

Таблица 4

Чисто ДТ реакций и энерговыделение системы

Газ	Лёд	Е
5,39 E11 шт	1,65 E13 шт	10,94898 Дж

Одномерный расчет сжатия DT-капсулы

Полученный отказ в зажигании двумерной системы побудил авторов к дальнейшим исследованиям, суть которых заключалась в проведении одноцентровых сферически-симметричных расчетов сжатия и горения капсулы, «вырезанной» из сквозного расчета с применением в качестве граничных условий полученных таблиц давлений и температур. На рис. 11 представлена геометрия системы (размеры капсулы описаны в табл. 1), в табл. 5 представлен вещественный состав системы. В качестве граничных условий использовались давления и температуры, накопленные в процессе двумерного расчета на экваторе капсулы (рис. 7 и 8).

Таблица 5

Состав

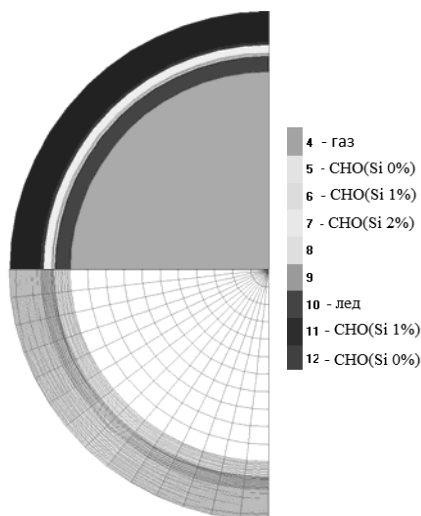


Рис. 11. Одномерная модель

№ вещества	Состав	ρ , г/см ³
4	Газ	0,0003
10	Лед	0,25
5	CHO (Si 0 %)	1,047
6	CHO (Si 1 %)	1,074
7	CHO (Si 2 %)	1,101
12	CHO (Si 1 %)	1,074
11	CHO (Si 0 %)	1,047

Результаты одномерного расчета

На рис. 12 приведены зависимости средних плотностей DT-топлива (DT-газа и DT-льда) от времени, а также по вспомогательной оси построены зависимости скоростей DT-реакций в слоях термоядерного топлива от времени. На рис. 13 и 14 приведены графики зависимости средних температур DT-газа и льда от времени. По значениям приведенных на графиках величин можно говорить о полноценном горении мишени. Полученный в расчете полный нейтронный выход $5,696 \cdot 10^{18}$ и энерговыделение 3,848 МДж позволяют говорить о горении системы с большим запасом. Максимальная скорость газовой оболочки на сжатие достигала 4500 км/с. Сжатие газовой области по радиусу составило примерно 42 раза, что по объему эквивалентно 75000 раз. Время горения DT смеси в наших расчетах составило порядка 0,1 нс. Мощность взрыва в тротиловом эквиваленте составила 920 грамм. Для сравнения фугасная противотанковая граната РПГ-40 содержит 760 г тротила.

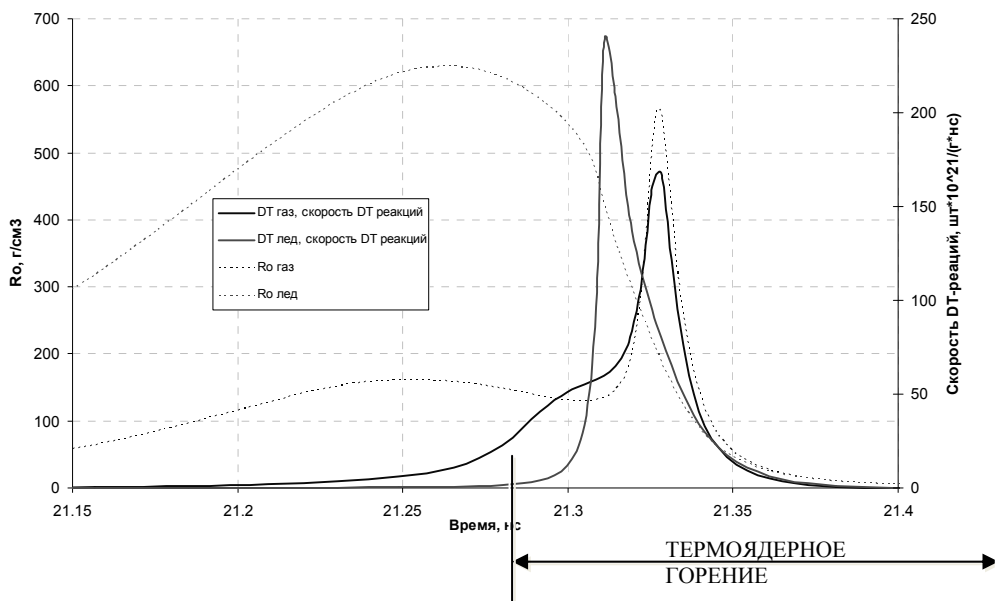


Рис. 12. Средняя плотностей DT-топлива (основная ось), зависимости скоростей DT-реакций (дополнительная ось) от времени

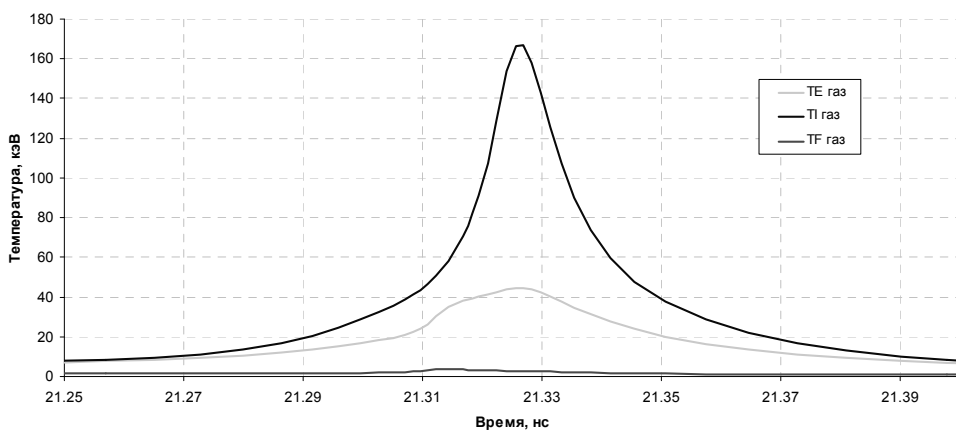


Рис. 13. Средние температуры в газовой области от времени

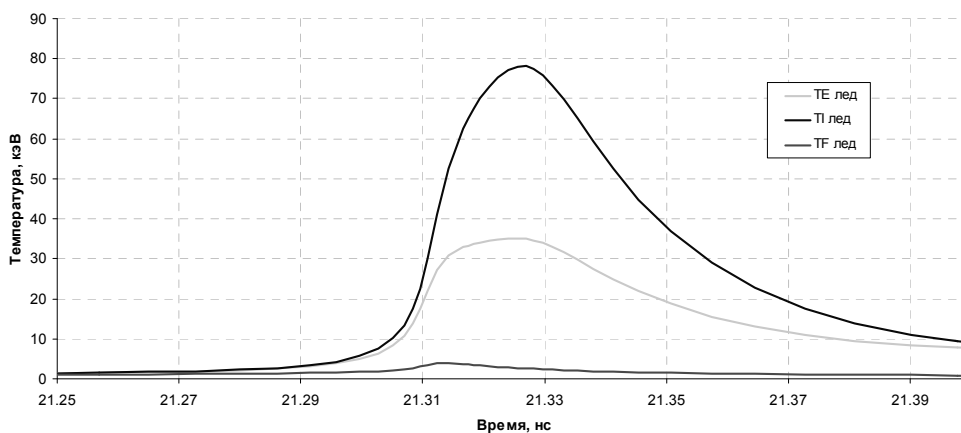


Рис. 14. Средние температуры DT-льда от времени

Итоги работы

- По комплексу ЛАСМ проведена серия сквозных двумерных расчетов сжатия и энерговыделения DT-капсулы.
- Получена оценка влияния полиамидной мембраны на характеристики обжигания криогенной мишени.
- По результатам двумерных расчетов можно констатировать отсутствие зажигания, тем не менее были получены энерговыделение и нейтронный выход. На внешней поверхности мишени были накоплены таблицы граничных условий.
- На основе полученных таблиц проведен одномерный расчет сжатия и энерговыделения DT-капсулы. Получено полномасштабное термоядерное горение мишени.

Литература

1. Clark et al. Three-dimensional simulations of low foot and high foot implosion experiments on the National Ignition Facility // *Physics of Plasmas*. – 2016. – 23. – 056302.
2. Дюдерштадт Дж., Мозес Г. Инерциальный термоядерный синтез. – М.: Энергоатомиздат, 1984.
3. Бельков С.А., Гаспарян П.Д., Кочубей Ю.К., Митрофанов Е.И. Модель среднего иона для расчета состояния многозарядной многокомпонентной нестационарной и неравновесной плазмы // *ЖЭТФ*. – 1997. – Т 111, Вып. 2. – С. 495 – 513.
4. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Электродинамика сплошных сред. – М.: Наука, 1992. – С. 428.
5. Kaiser T.B. Laser ray tracing and power deposition on a unstructured three-dimensional grid // *Physical Review*. – 2000. – V.61, no. 1. – P. 895 – 905.
6. Liu S.B., Luo P.Q., Zang Y.H. et al. Three-dimensional optical trajectory tracing and energy deposition in a laser-driven plasmas // *Physical Review*. – 2000. – V. 63.

ESTIMATIONS OF POSSIBLE IGNITION OF DT-CAPSULE IN SHOCK-CAPTURING COMPUTATIONS FOR THE RADIATION PROPAGATION IN THE CYLINDRICAL HOHLRAUM AT LASER FACILITIES

V. Yu. Rezchikov, V. Yu. Morozov, A. A. Busalov, N. A. Vershinina

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

The report describes the results of the first computations using LASM program package for compression and non-equilibrium burning of the cryogenic capsule with thermonuclear fuel in a shock-capturing case. Experiment Low-foot N111215 for NIF facility was chosen as an initial setup. Simulated physical processes accounted for in the computations surely provide for the estimated ignition and burning of the ideal spherically symmetrical systems with DT-fuel. Basing on the computational results we analyzed the processes of the radiation propagation within the hohlraum and considered the mechanism of the effect of the polyamide membrane that closes the input.

Key words: laser thermonuclear fusion, DT-capsule, X-radiation, hohlraum.