

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

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

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

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 N111215 для лазерно-физической установки NIF [1]. Моделируемые физические процессы, учитываемые 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.

### 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. В настоящее время, как мы знаем, во ВНИИЭФ строится аналогичный комплекс – установка УФЛ-2М, с планируемой пиковой мощностью 2 МДж.

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. и т. п.

## 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.

Комплекс ЛАСМ разрабатывается с 2013 года. Результаты полученные по комплексу ЛАСМ не являются секретными и могут быть опубликованы в открытых источниках. 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 (автор модели: Бондаренко С. В.). Реализована возможность расчета УРСов и пробегов по «модели среднего иона» Белькова С. А. Единицы измерения комплекса 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:

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

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

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

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

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

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

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

Здесь  $\rho$  – плотность,  $A$  – атомный вес,  $Z$  – степень ионизации (заряд иона),  $v_e$  – эффективная частота столкновений,  $\omega_0$  – частота и  $\lambda_0$  – 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 N111215. Для наглядности представим трехмерную модель хольраума – рис. 1.

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

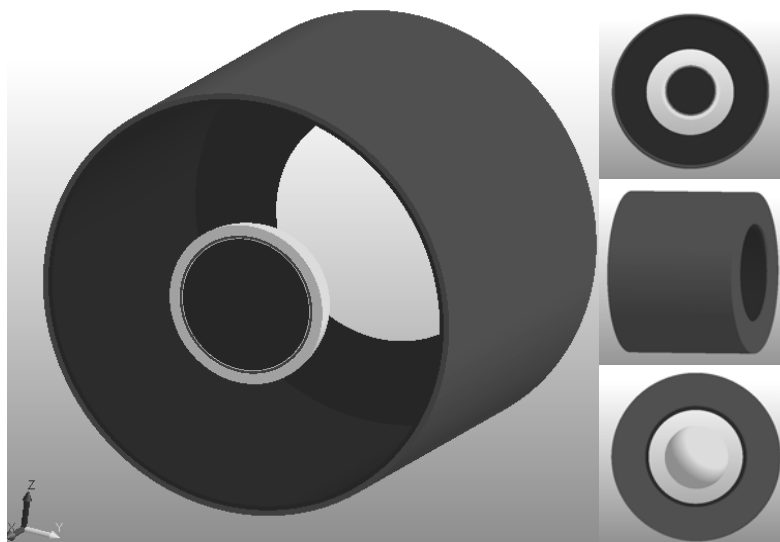


Рис. 1. Трехмерная модель Хольраума

### 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.

Таблица 1

Состав

Состав0	$\rho$ [г/см <sup>3</sup> ]
Газ	0,0003
лед	0,25
СНО (Si 0 %)	1,047
СНО (Si 1 %)	1,074
СНО (Si 2 %)	1,101
СНО (Si 1 %)	1,074
СНО (Si 0 %)	1,047
He	0,00096
Au	19,3
СН	1,2
СН	1
He	0,0001

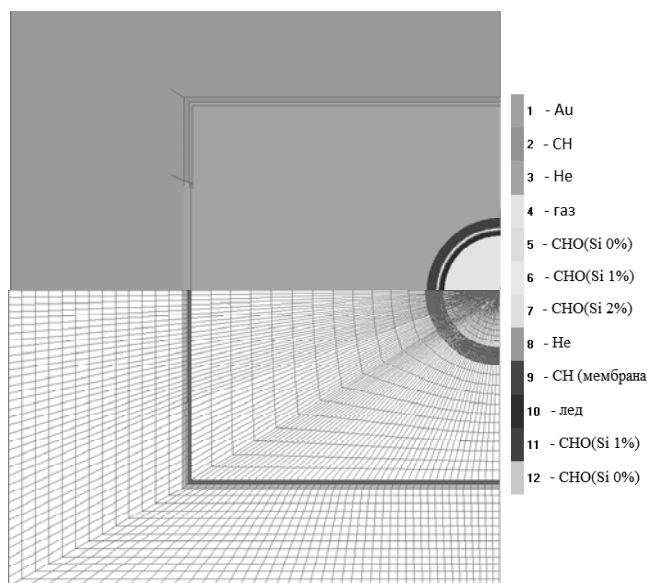


Рис. 2. Двумерная модель задачи

### Лазерный источник

На рис. 3 представлено пространственное распределение лазерного источника. В трехмерном случае система состоит из 48 лазерных источника, 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.

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.

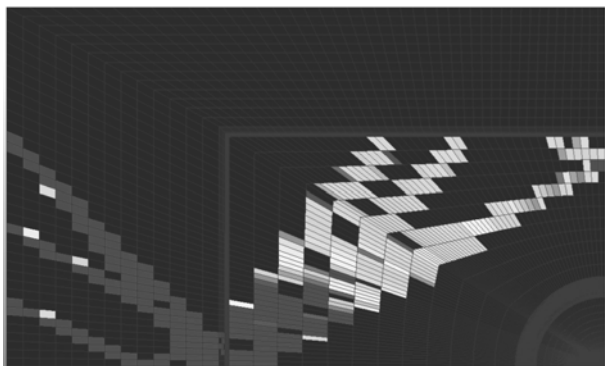


Рис. 3. Схема засветки ЛИ

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

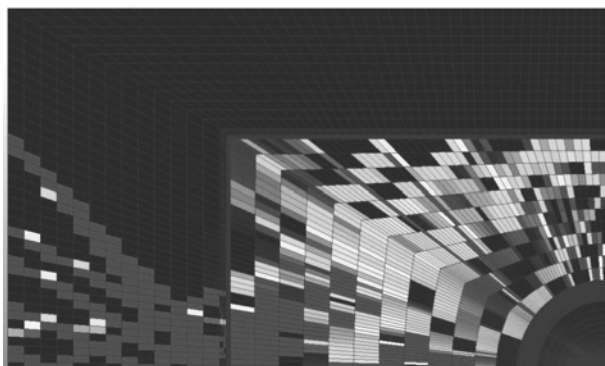


Рис. 4. Схема засветки ЛИ с отражениями

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

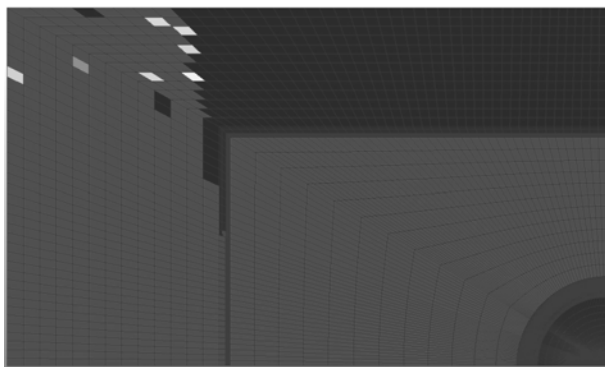


Рис. 5. Схема засветки ЛИ (4 источника по 100 лучей)

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

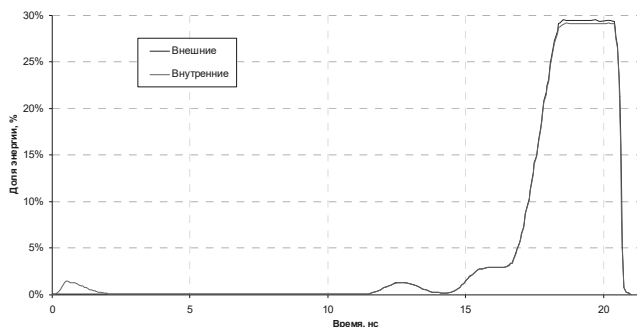


Рис. 6. Распределение доли интенсивности ЛИ от времени

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

Таблица 2

Энергетика источников ЛИ

	Внешние	Внутренние
Энергия пучков	1000 кДж	500 кДж
Полная энергия	1500 кДж	

Таблица 3

Координаты источников ЛИ

Номер луча	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

Результаты двумерных расчетов

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

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

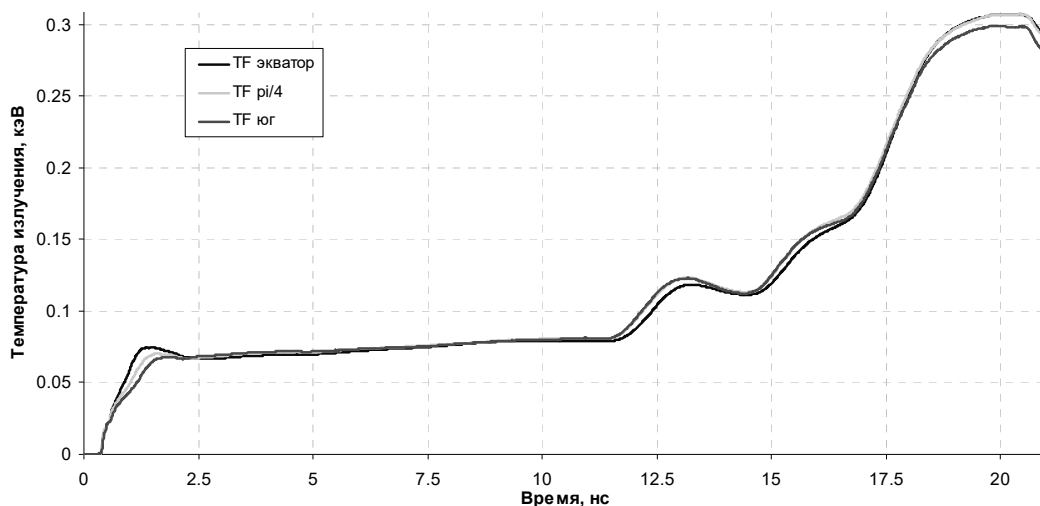


Рис. 7. Температура излучения на поверхности капсулы в контрольных точках от времени

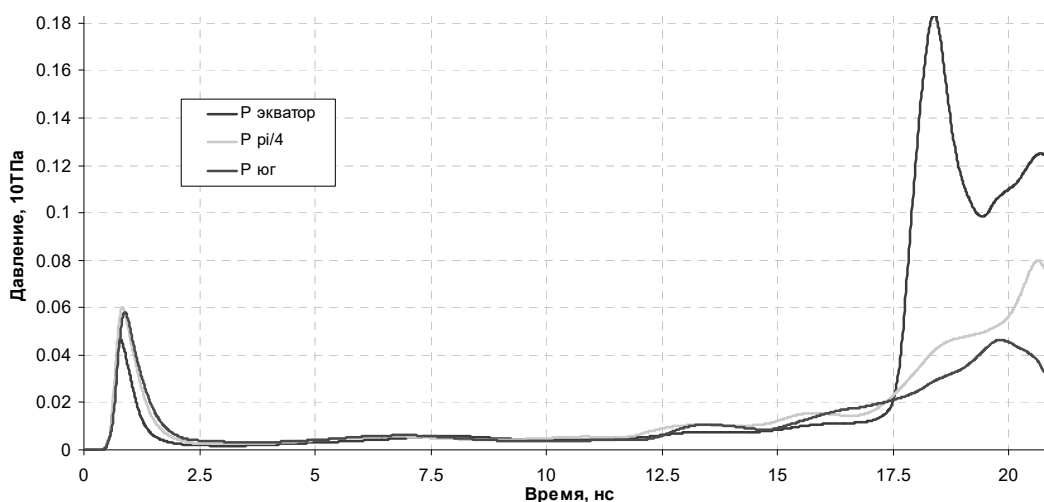


Рис. 8. Давление на поверхности капсулы в контрольных точках от времени

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 тон-

кая 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 обжатие 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.

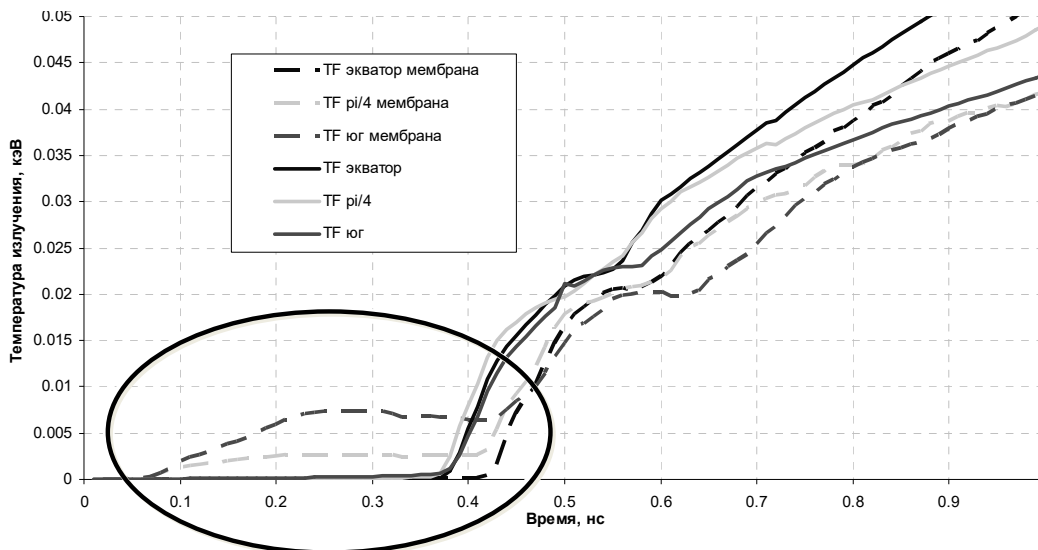


Рис. 9. Температура излучения на поверхности капсулы в контрольных точках от времени

**Оценка возможности зажигания DT-капсулы**

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

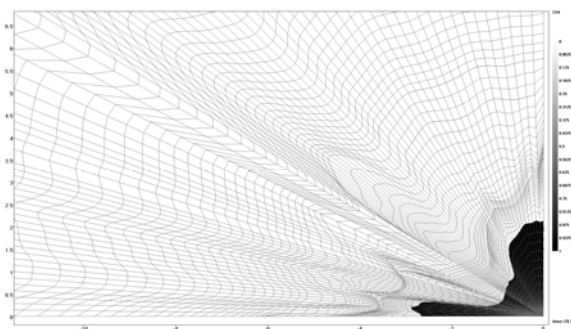


Рис. 10. Пространственное распределение DT топлива в расчете на момент 20,5 нс

Зажигание мишени определяется исключительно способностью к горению DT-газа основными критериями для получения зажигания термоядерного топлива является одновременное сочетание определяющих величин: поверхностной плотностью  $\rho R$  ( $>0,3$  г/см<sup>2</sup>), плотности (200 г/см<sup>3</sup>) и температуры (5–10 кэВ).

Средняя температура ионов DT топлива в нашем расчете составила порядка 1 КэВ, максимальное значение плотности  $\sim 35$  г/см<sup>3</sup>. Таким образом у нас в расчете не реализовались необходимые условия зажигания и по температуре и по плотности DT смеси. По правде сказать никто и не рассчитывал с первого раза получить успешное обжатие капсулы даже в наших фактически иде-

альных условиях моделирования процессов. Тем не менее мы смогли смоделировать обжатие DT капсулы сквозным образом в двумерной постановке задачи. Также мы смогли получить характеристики DT «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 одноцентровой расчет обжатия DT капсулы, но уже в одномерной постановке

Таблица 4

Чисто DT реакций и энерговыделение системы

Газ	Лед	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, 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.

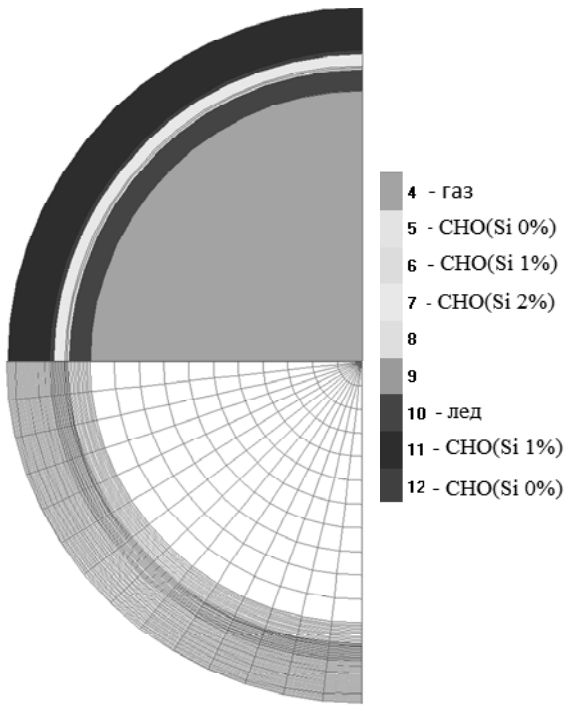


Рис. 11. Одномерная модель

### Результаты одномерного расчета

На рис. 12 приведены зависимости средних плотностей ДТ-топлива (ДТ-газа и ДТ-льда) от времени, а также по вспомогательной оси построены зависимости скоростей ДТ-реакций в слоях

Таблица 5

Состав

№ вещества	Состав	$\rho$ [г/см <sup>3</sup> ]
4	газ	0,0003
10	лед	0,25
5	СНО (Si 0 %)	1,047
6	СНО (Si 1 %)	1,074
7	СНО (Si 2 %)	1,101
12	СНО (Si 1 %)	1,074
11	СНО (Si 0 %)	1,047

термоядерного топлива от времени. На рис. 13 и 14 приведены графики зависимости средних температур ДТ-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 ДТ 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 грамм тротила.

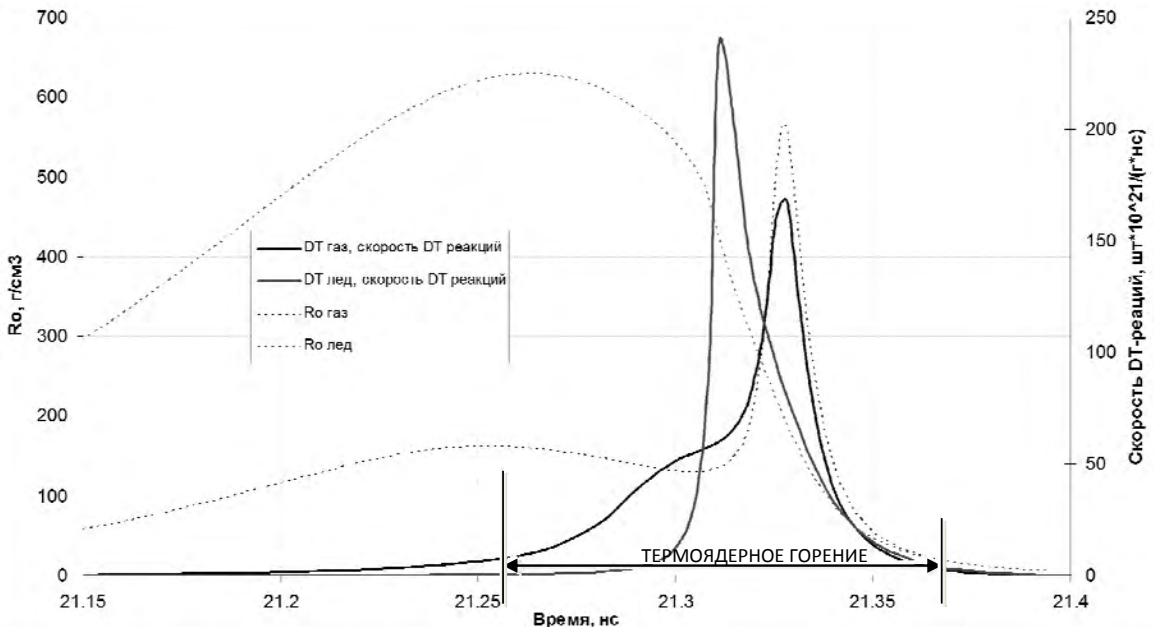


Рис. 12. Средняя плотностей ДТ-топлива (основная ось), зависимости скоростей ДТ-реакций (дополнительная ось) от времени

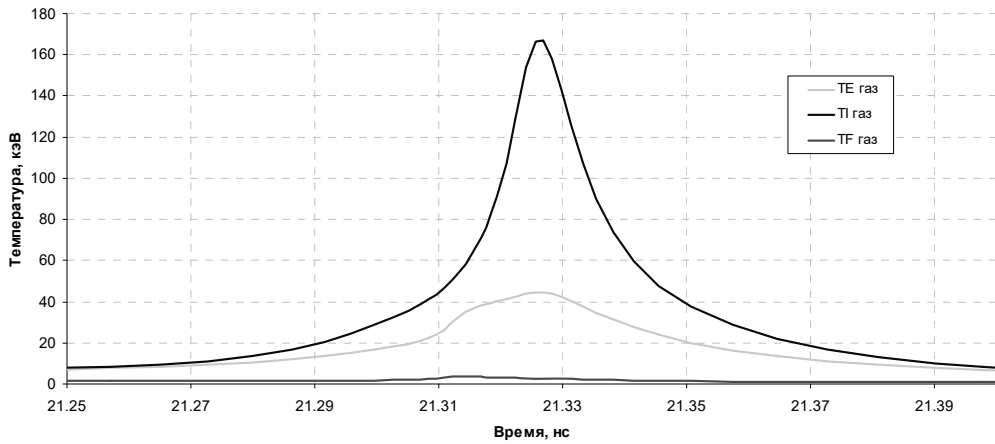


Рис. 13. Средние температуры в газовой области от времени

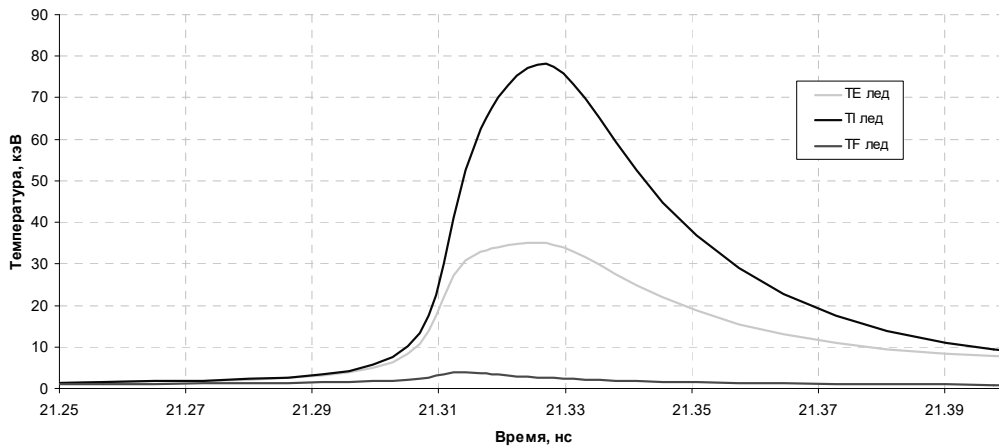


Рис. 14. Средние температуры DT-льда от времени

### Итоги работы

- По комплексу ЛАСМ проведена серия сквозных параллельных двумерных расчетов сжатия и энерговыделения DT-капсулы
- Получена оценка влияния полиамидной мембраны на характеристики обжатия 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
- На основании полученных результатов можно констатировать: в РФЯЦ-ВНИИЭФ суще-

ствует предсказательный программный инструмент, позволяющий моделировать процессы лазерного термоядерного синтеза

### Список литературы

1. Clark et al. Three-dimensional simulations of low foot and high foot implosion experiments on the National Ignition Facility // *Physics of Plasmas* 23, 056302 (2016).
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.