



РФЯЦ-ВНИИТФ
РОСАТОМ

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ ПЕРЕНОСА РЕНТГЕНОВСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ В ЗАДАЧАХ ИТС ДЛЯ МИШЕНЕЙ С НЕПРЯМЫМ ВОЗДЕЙСТВИЕМ

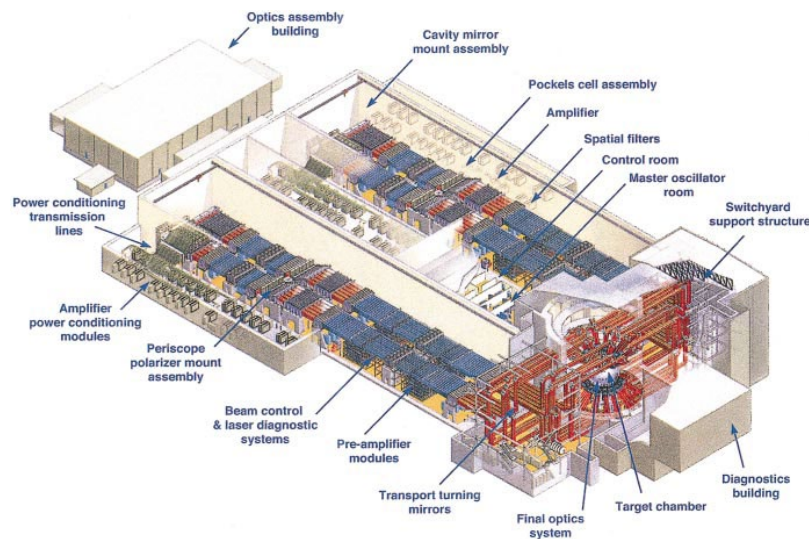
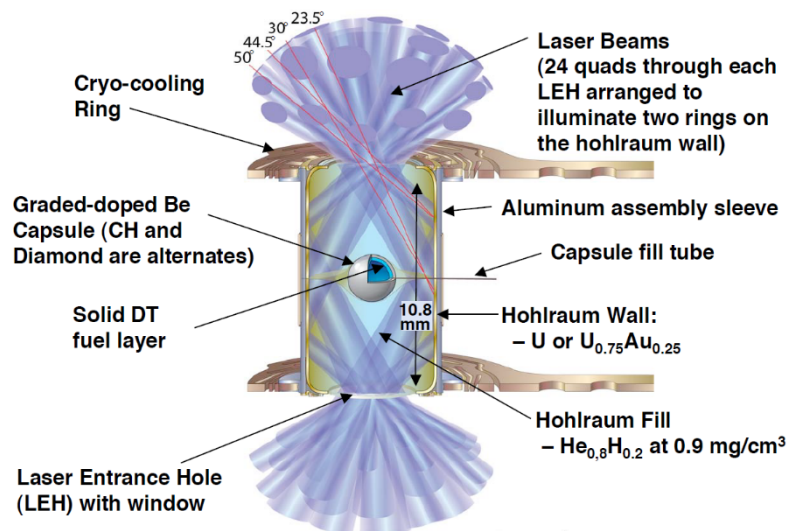
XVI Забабахинские научные чтения, Снежинск, 2023

Чубарешко Илья Сергеевич, Лыков В.А., Шестаков А.А.

Введение

В РФЯЦ-ВНИИТФ ведутся работы по развитию технологии расчетов мишеней инерциального термоядерного синтеза (ИТС) для более качественной постановки экспериментов на мощных лазерных установках.

Облучение мишеней:	Лазерные установки:	Форма бокса:
<ul style="list-style-type: none">• прямое;• не прямое.	<ul style="list-style-type: none">• OMEGA (США);• NIF (США);• Shenguang-III (Китай);• LMJ (Франция).	<ul style="list-style-type: none">• цилиндрическая;• сферическая;• «регби».



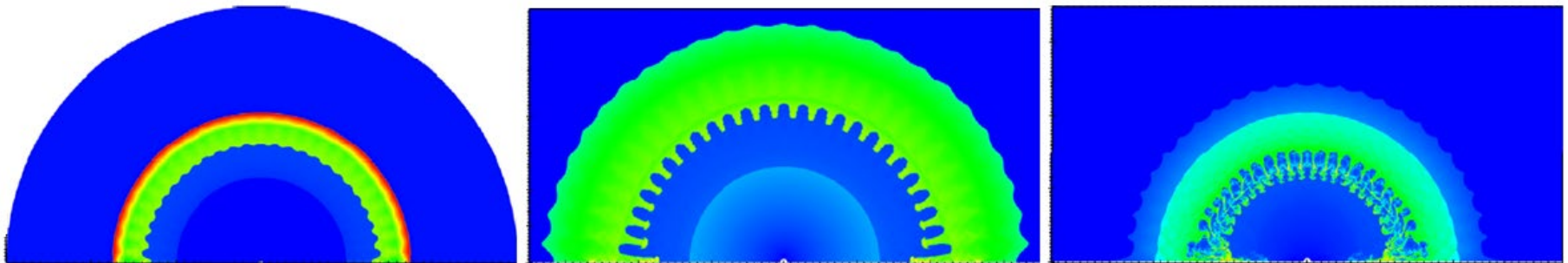


Цели и задачи работы



РФЯЦ-ВНИИТФ
РОСАТОМ

- определение асимметрии облучения мишеней потоком рентгеновского излучения при его распределении в полости цилиндрического и сферического боксов по двумерному комплексу БТ-ТОМ для изучения возможности симметризации сжатия мишеней ИТС.



Моделируемые процессы

- газодинамическое движение;
- перенос рентгеновского излучения в сером кинетическом приближении;
- поглощение лазерного излучения.

Задача 1



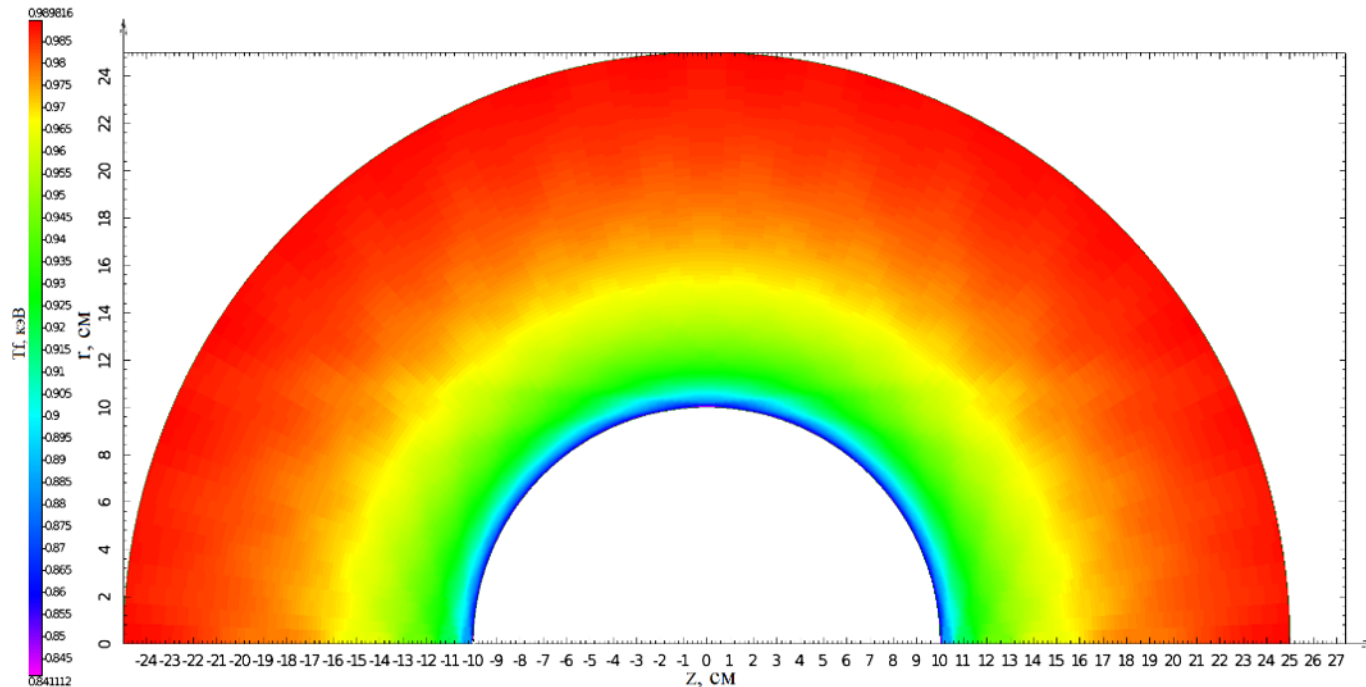
$$J(t, R_1 = 10; \theta; \Omega \cdot \vec{n} < 0) = 0,$$

$$J(t, R_2 = 25; \theta; \Omega \cdot \vec{n} < 0) \equiv J_{sp}(t, \theta),$$

$$J_{sp}(t, \theta) = \frac{c\sigma T_{f,гран}^4(t)}{4\pi} (1 + k_2 P_2(x) + k_4 P_4(x)),$$

$$P_2(x) = \frac{1}{2}(3x^2 - 1), \quad P_4(x) = \frac{1}{8}(35x^4 - 30x^2 + 3).$$

№ варианта	k_2	k_4
1	0	0
2	0.16	0
3	0	0.16



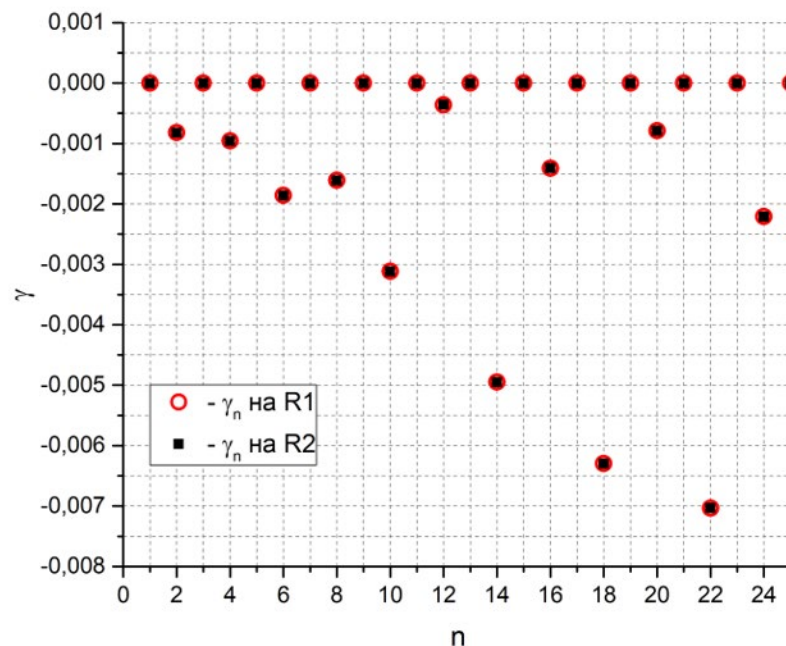
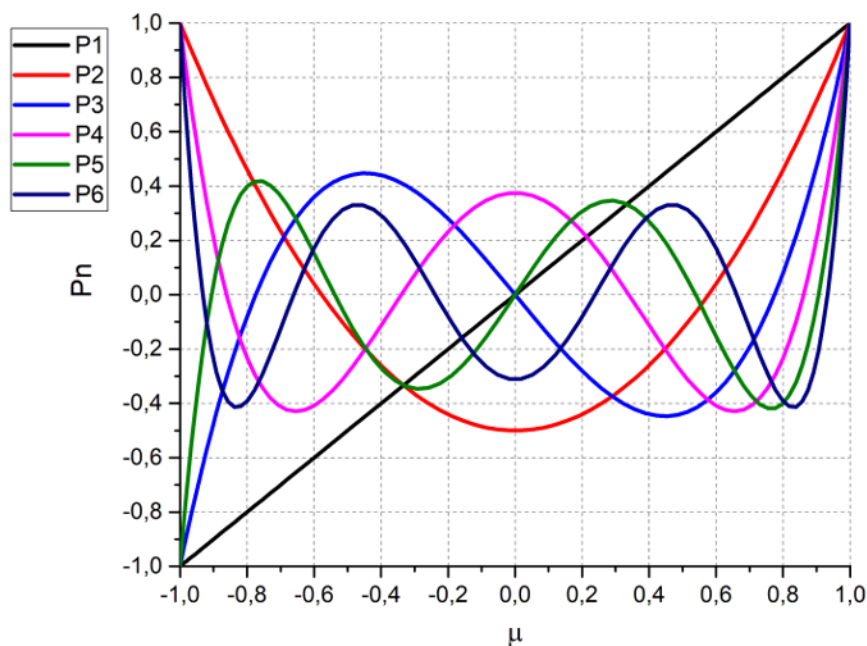


Полиномы Лежандра. Коэффициенты асимметрии облучения

$$S(t, \mu) = \sum_{l=0}^L a_l(t) \cdot P_l(\mu) = S_0(t) (1 + \gamma_1(t) P_1(\mu) + \gamma_2(t) P_2(\mu) + \gamma_3(t) P_3(\mu) + \dots),$$

$$\mu = \cos \theta, \quad S_0(t) = \frac{1}{2} \int_{-1}^1 S(t, \mu) d\mu, \quad \gamma_n(t) = \frac{2n+1}{2S_0(t)} \int_{-1}^1 S(t, \mu) P_n(\mu) d\mu,$$

$$P_{n+1}(\mu) = \frac{\mu(2n+1)}{n+1} P_n(\mu) - \frac{n}{n+1} P_{n-1}(\mu), \quad P_0(\mu) = 1, \quad P_1(\mu) = \mu.$$





Сравнение с аналитическим решением



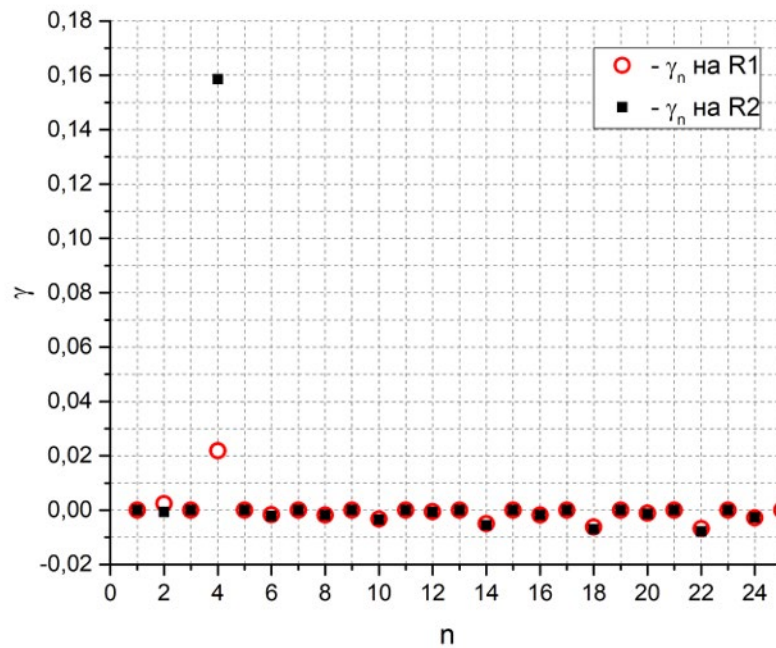
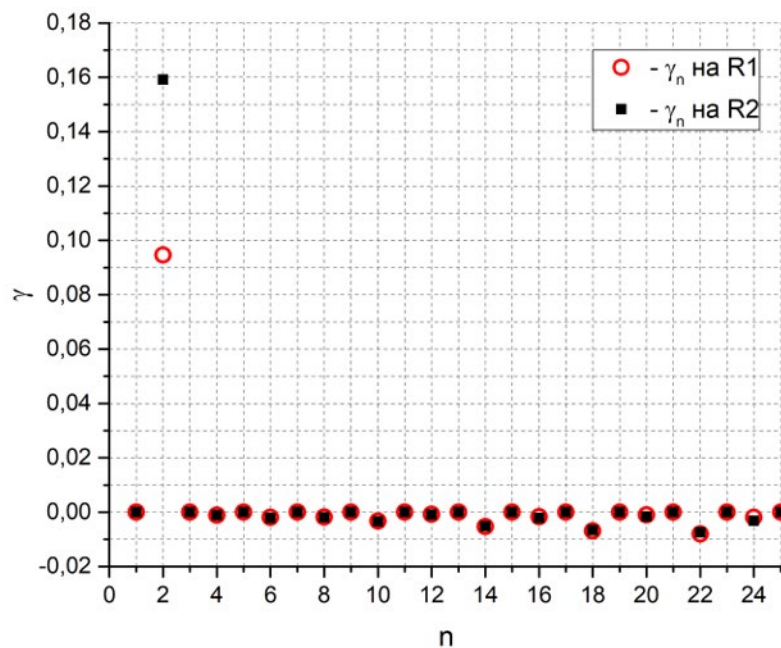
$$S(t, \mu) = \sum_{n=0} a_n(t) \cdot P_n(\mu) = S_0 \left[1 + \sum_{n=1} \gamma_n \cdot P_n(\mu) \right],$$

$$S^0(t, \mu) = \sum_{n=0} a_n^0(t) \cdot P_n(\mu) = S_0 \left[1 + \sum_{n=1} \gamma_n^0 \cdot P_n(\mu) \right],$$

$$A_n(k) = \frac{a_n^0}{a_n} = \frac{\gamma_n^0}{\gamma_n}.$$

$$A_n(k) = 2 \int_k^1 \frac{(\mu - k)(1 - k\mu)}{(1 - 2k\mu + k^2)^2} P_n(\mu) d\mu,$$

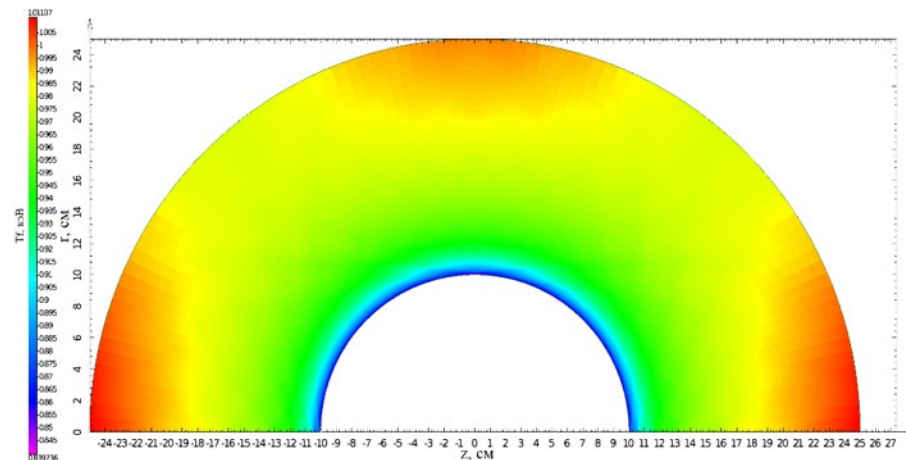
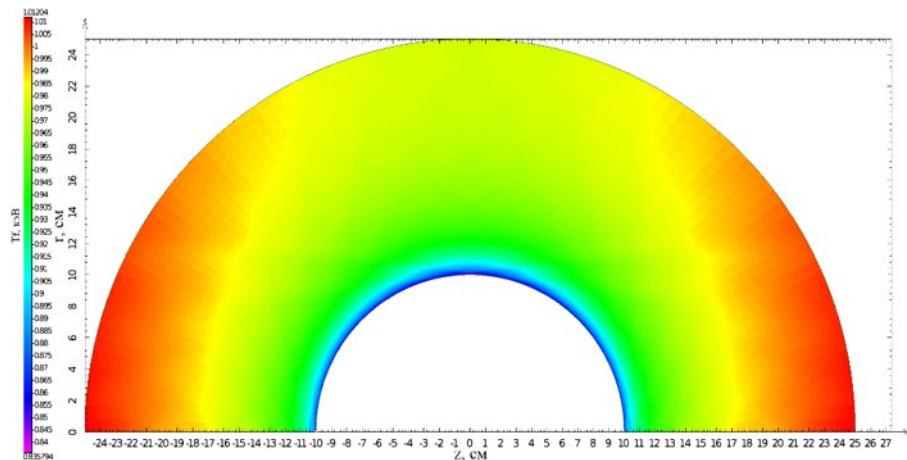
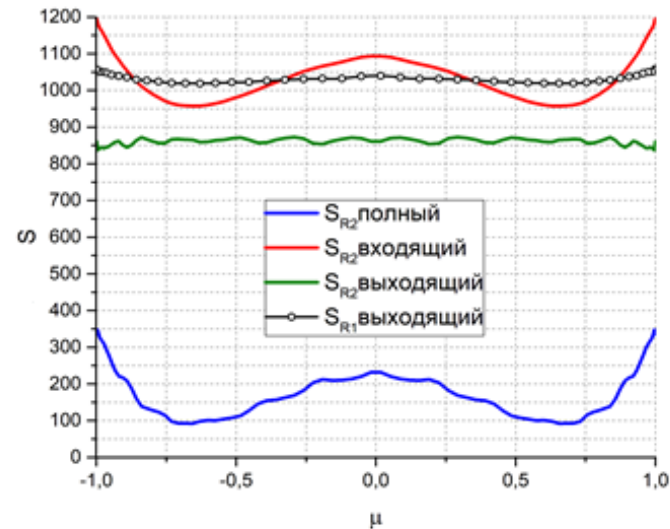
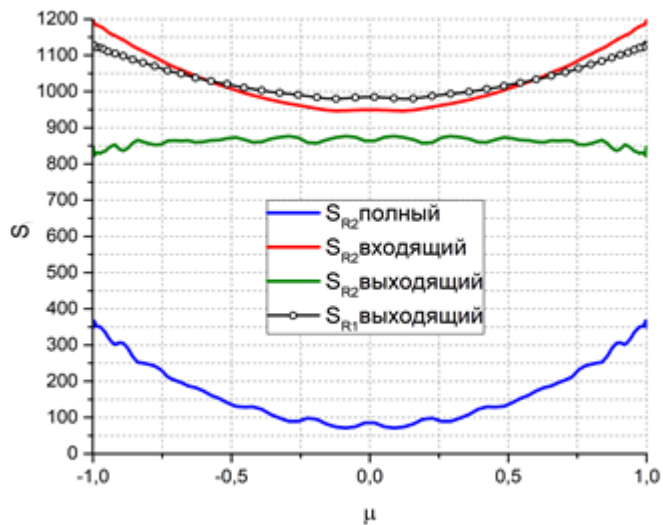
при $k = \frac{R_1}{R_2} = 0.4$, $A_2 = 0.5944$, $A_4 = 0.1448$



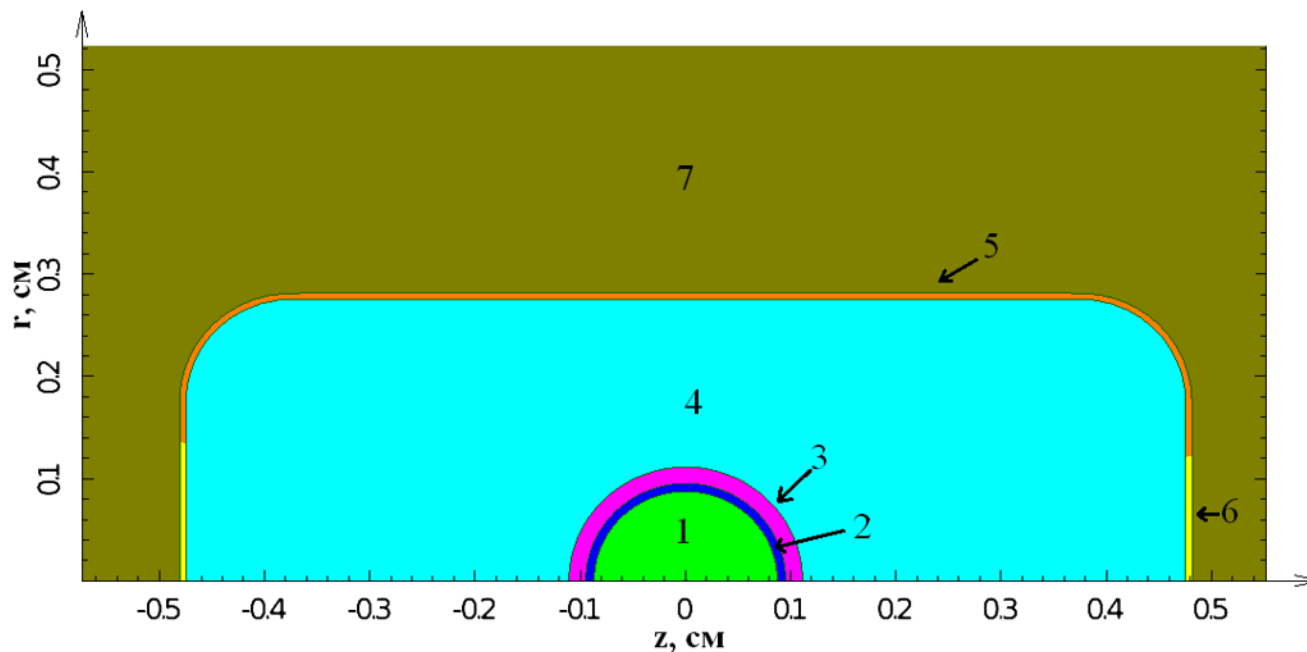
Результаты расчетов



РФЯЦ-ВНИИТФ
РОСАТОМ



Задача 2



Параметры системы

№ обл.	Вещество	ρ_0 (г/см ³)	Сетка по радиусу
1	DT газ	$3 \cdot 10^{-4}$	8
2	DT лед	0.25	14
3	СНОВr	1.05	80
4	He _{0.34} H _{0.66}	$8 \cdot 10^{-4}$	20
5	Au	19.3	83
5	CH(окна)	0.0175	83

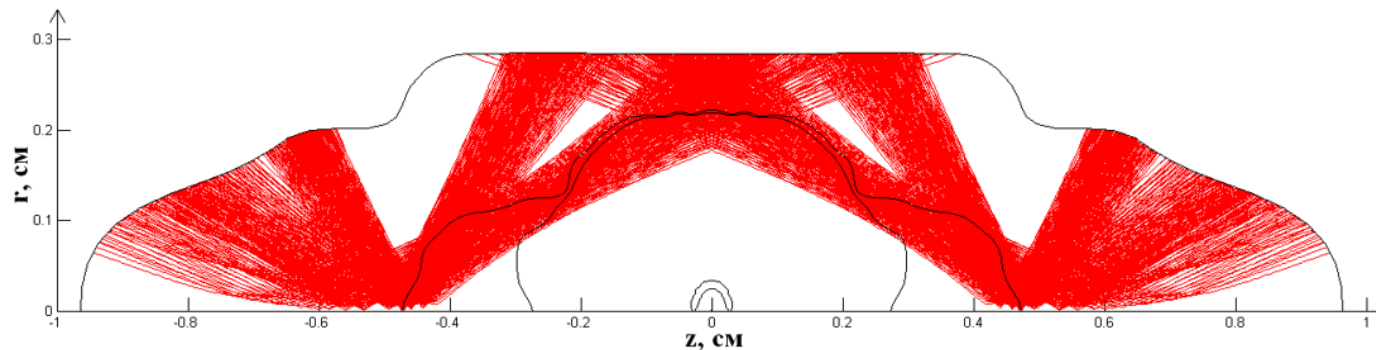
Параметры лазерных лучей

№ луча	1	2	3
θ_{RAY}	59.5°	49°	33.2°
α_{max}	3.6°	3.6°	3.6°
r_f (ММ)	0.5	1.5	2
z_f (ММ)	5.5	6.3	8
R (ММ)	0.3	0.3	0.3

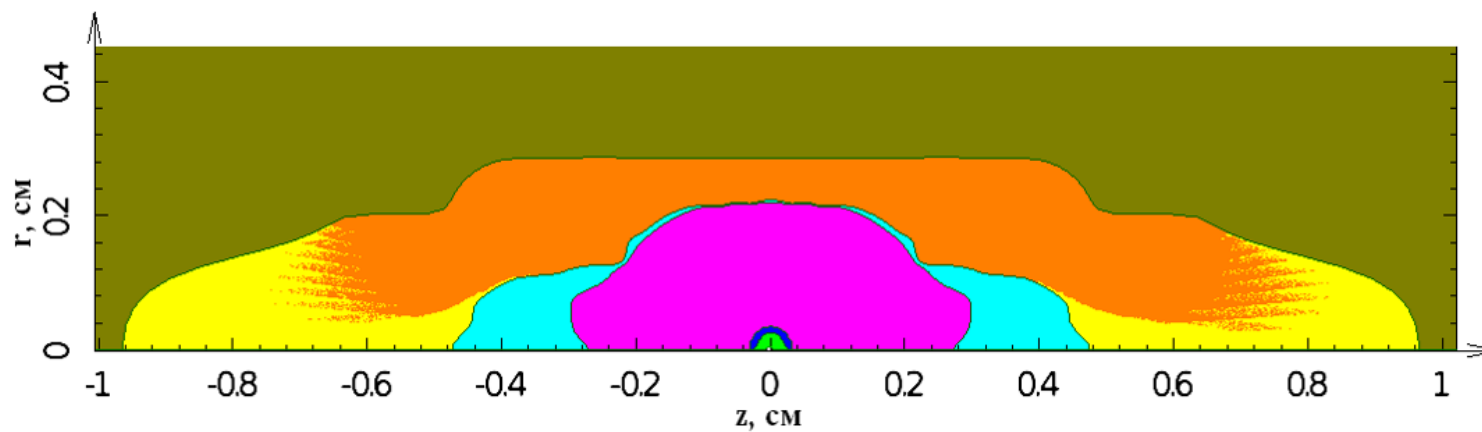
Результаты расчетов



РФЯЦ-ВНИИТФ
РОСАТОМ



Ход лазерных лучей внутри полости бокса на
конечный момент времени

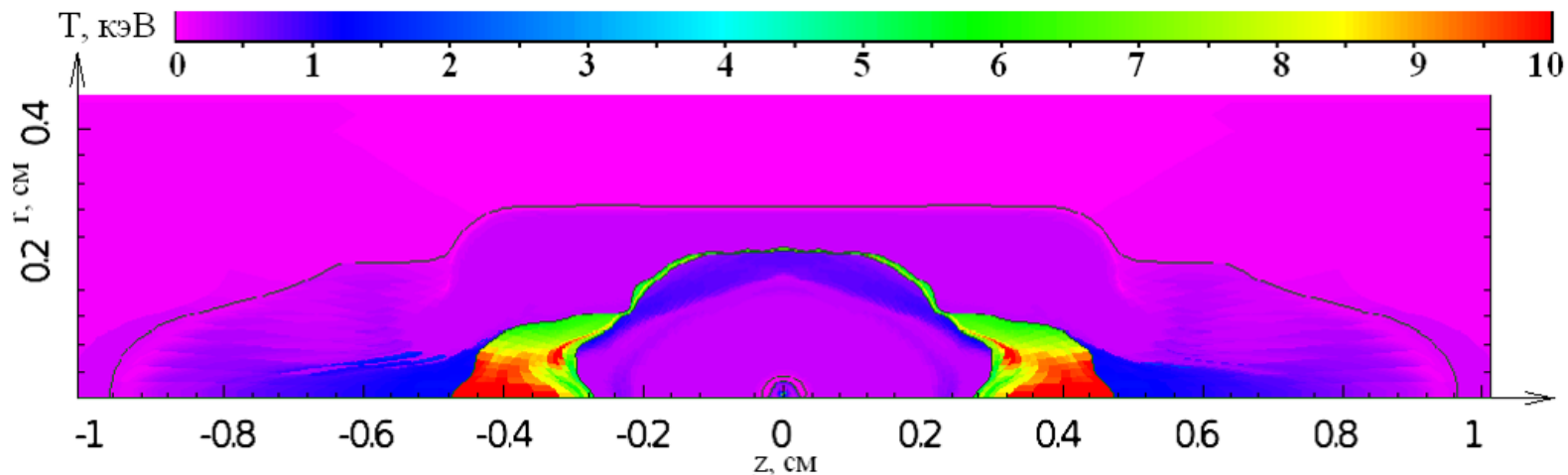


Распределение веществ по системе

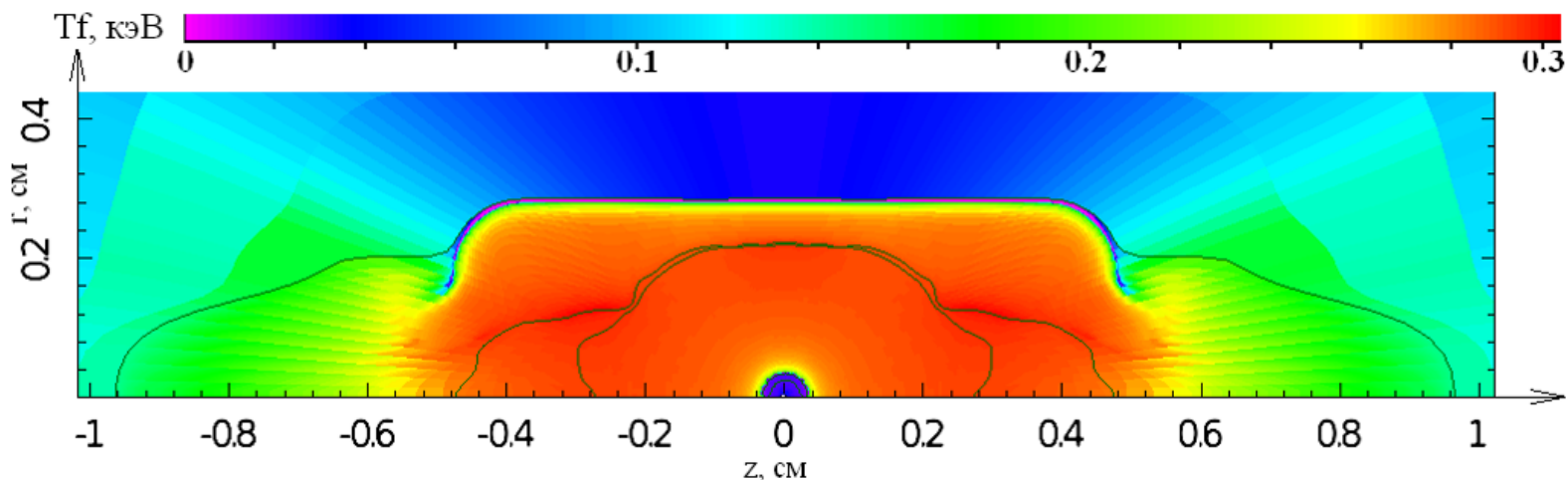
Результаты расчетов



РФЯЦ-ВНИИТФ
РОСАТОМ

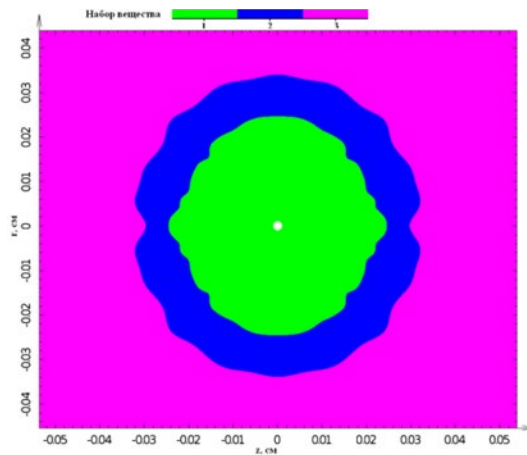


Распределение температуры вещества

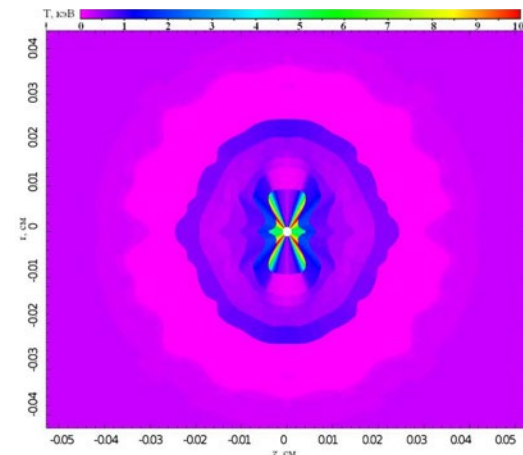


Распределение температуры излучения

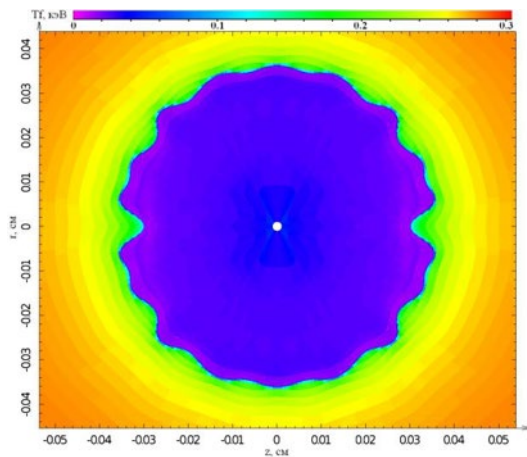
Результаты расчетов



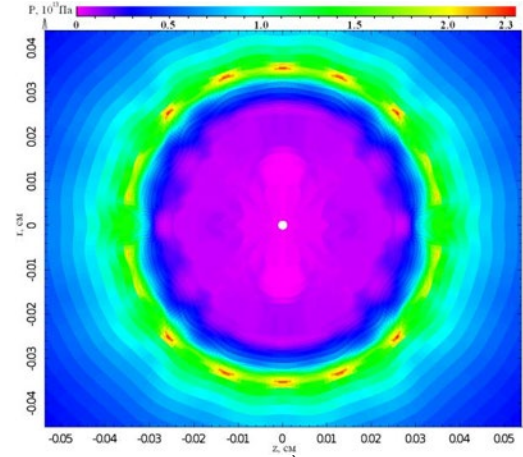
а)



б)



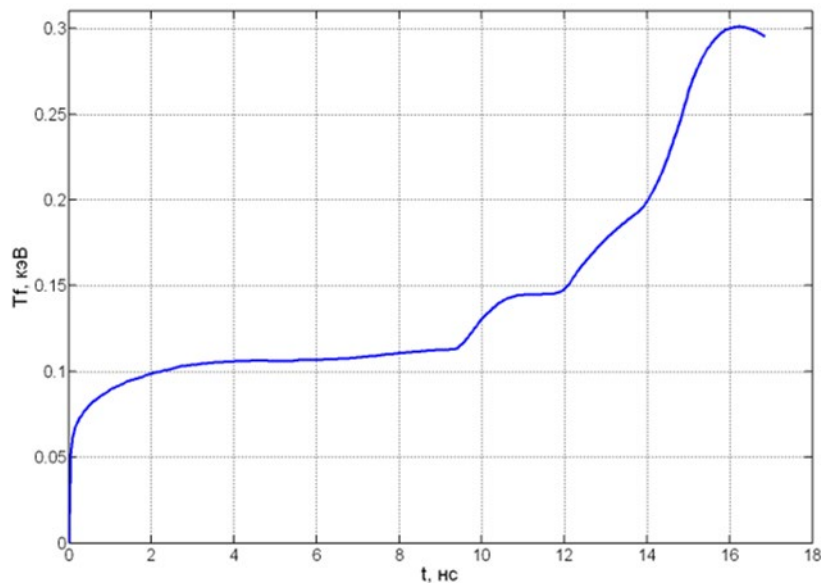
в)



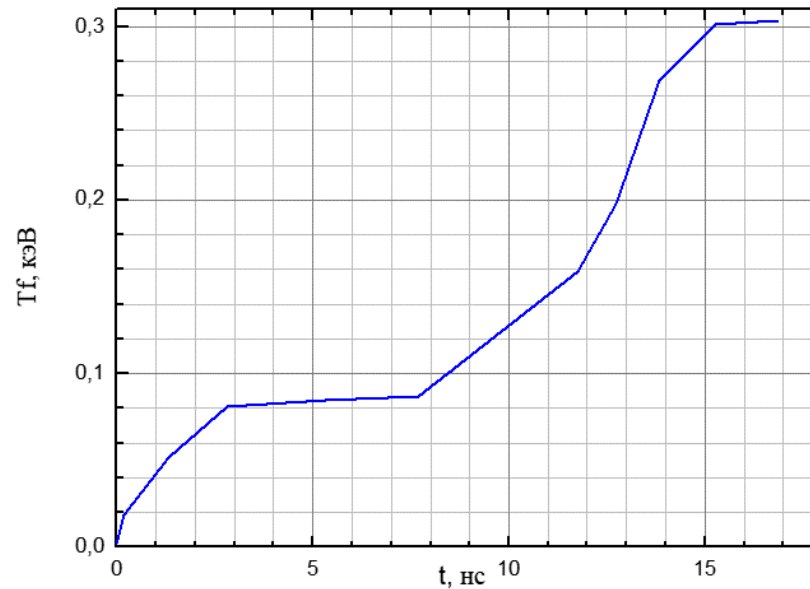
г)

Состояние мишени на конечный момент времени: а) набор вещества (пурпурный- полистирол, синий- DT-лёд, зелёный- DT-газ), б) температура вещества, в) температура излучения, г) давление

Результаты расчетов



а)



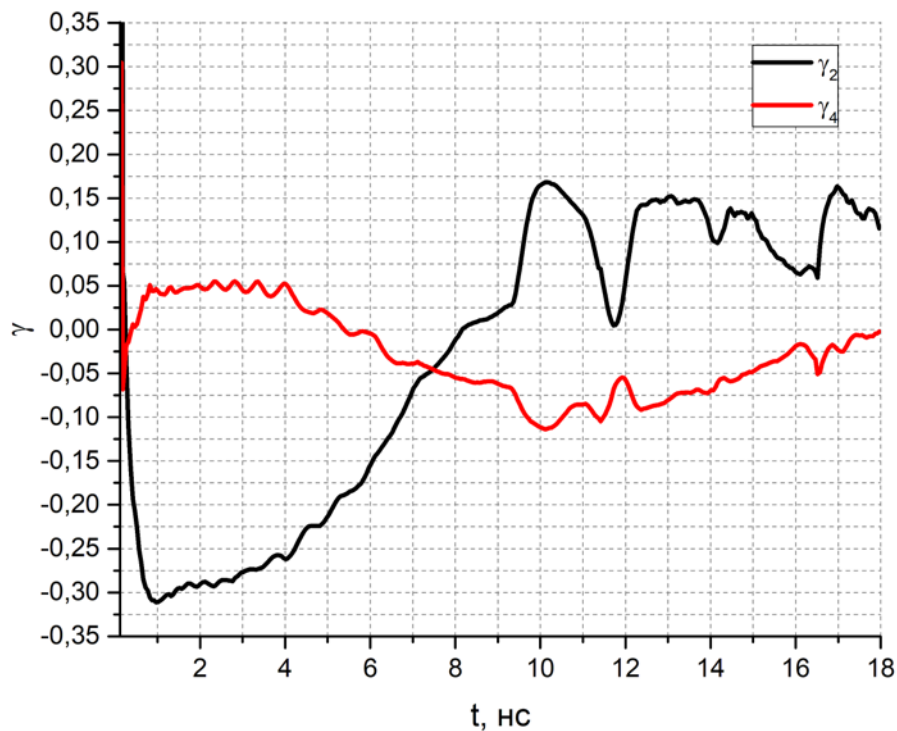
б)

Зависимость фотонной температуры на поверхности мишени от времени:

а) профиль температуры, полученный по расчетам комплекса БТ-ТОМ с использованием программного модуля LASER,

б) профиль температуры взятый из работы P.A.Holstein, F.Chaland Evolution of the target design for the MJ laser. Laser and Particle Beams, 17(3), pp.403-413, 1999.

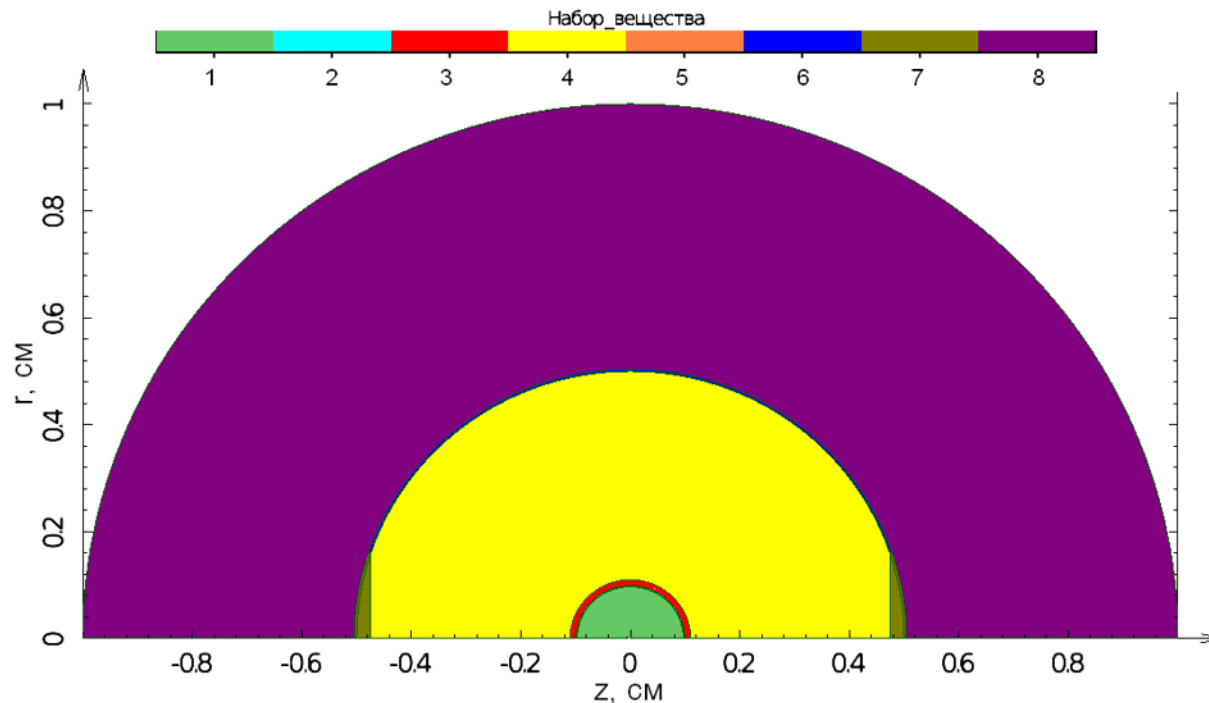
Результаты расчетов



t, нс	γ_2	γ_4
10	0.1655	-0.1116
15	0.1268	-0.0472
17	0.1618	-0.0243
18	0.1153	-0.0022

Коэффициенты γ на несколько промежуточных моментов времени.

Задача 3



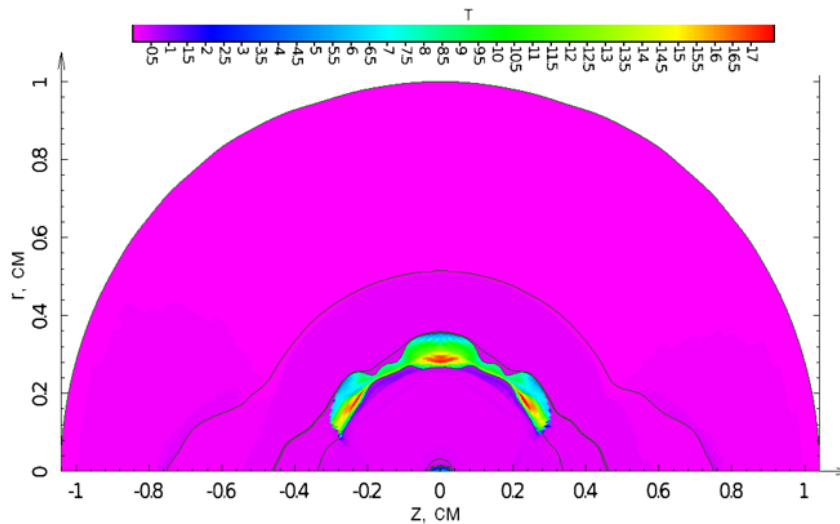
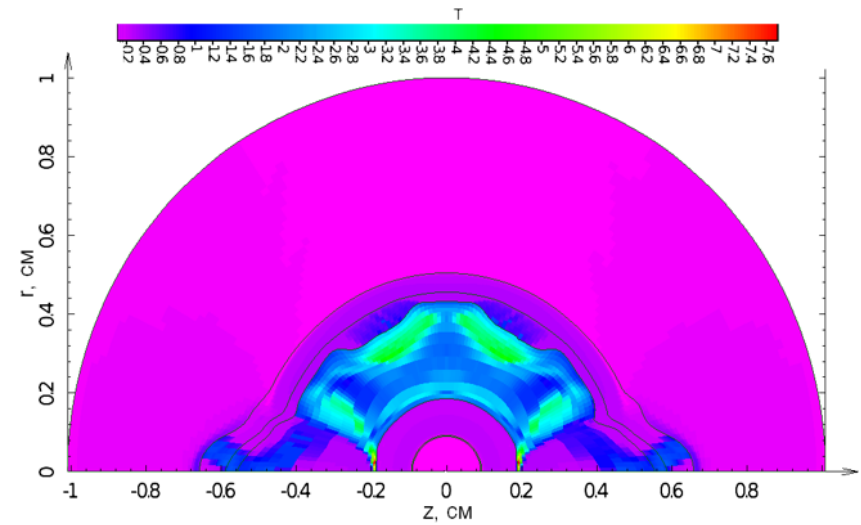
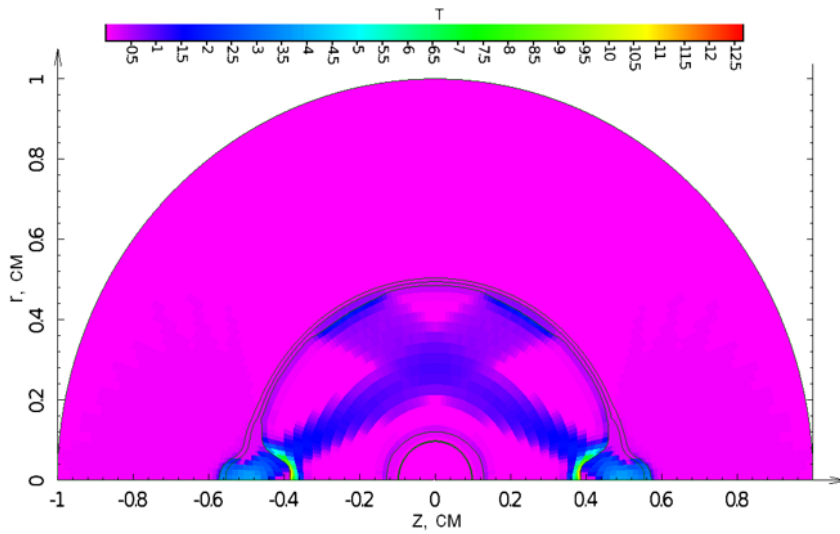
Параметры системы

Обл.	В-во	$\rho, \text{г/см}^3$
1	DT	0.03
2	Al	2.7
3	Al	2.7
4	He ⁴	$4 \cdot 10^{-4}$
5	CH	0.02

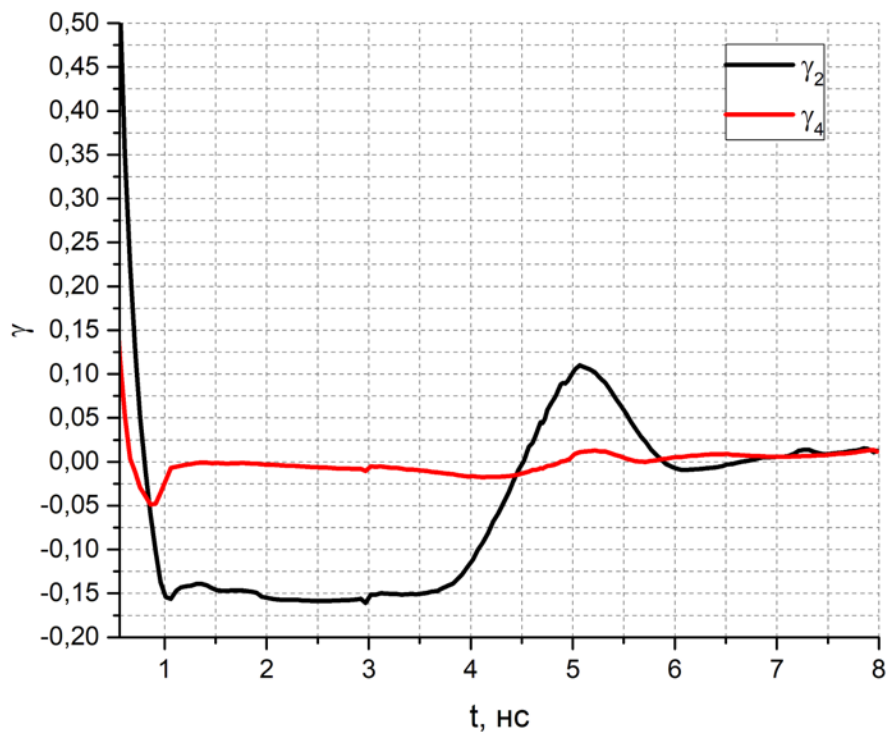
Параметры лазерных лучей

№ конуса	1	2
Доля мощности в пучке от полной $P(t)$	0.5	0.5
Θ - угол с осью симметрии	30°	150°
α_{max} - угол полураствора пучка	6°	6°
$r_f(\text{л.ед.д.})$ - координаты фокуса	0.0	0.0
$z_f(\text{л.ед.д.})$ - координаты фокуса	51.0	-51.0
$r_0(\text{л.ед.д.})$ - радиус фокального пятна	3.0	3.0

Результаты расчетов



Результаты расчетов



t, нс	γ_2	γ_4
1	-0.1541	-0.0213
3	-0.1516	-0.0054
6.6	-0.0009	0.0078
8	0.0123	0.0119

Коэффициенты γ на несколько промежуточных моментов времени.

Заключение

- Для оценки точности моделирования асимметрии облучения мишеней потоком рентгеновского излучения проведено сравнение результатов численных расчетов с аналитическими решениями. Результаты расчетов показали, что значения коэффициентов редукции излучения $A_{2,4}$ согласуются с аналитическими значениями.
- В расчетах получено, что коэффициенты асимметрии облучения ведут себя немонотонно. На времена, близкие к завершению расчетов, амплитуды коэффициентов уменьшаются.
- В сферической системе в момент максимального сжатия мишени амплитуды коэффициентов асимметрии меньше, чем в цилиндрической.
- Дальнейшие работы по исследованию симметрии облучения мишеней предполагают совершенствование модели поглощения с учетом прохождения и отражения лазерных лучей в плазме.

Благодарности

Шушлебину А.Н. за поддержку данной работы,
Кошелеву В.С., Соколову Р.Н., Сырцову А.А., Ураковой А.В.
за консультации по комплексу БТ-ТОМ,
Заболотниковой Т.В., Стрелец Е.Ю. за консультации при счете задач.

Спасибо за внимание

Чубарешко Илья Сергеевич

XVI Забабахинские научные чтения, Снежинск, 2023

