



РФЯЦ-ВНИИТФ  
РОСАТОМ

# **Трехмерные аналитические расчеты поля теплового излучения внутри сферического бокса с круговыми конверторами, нагреваемыми снаружи лазерными пучками мегаджоульной установки**

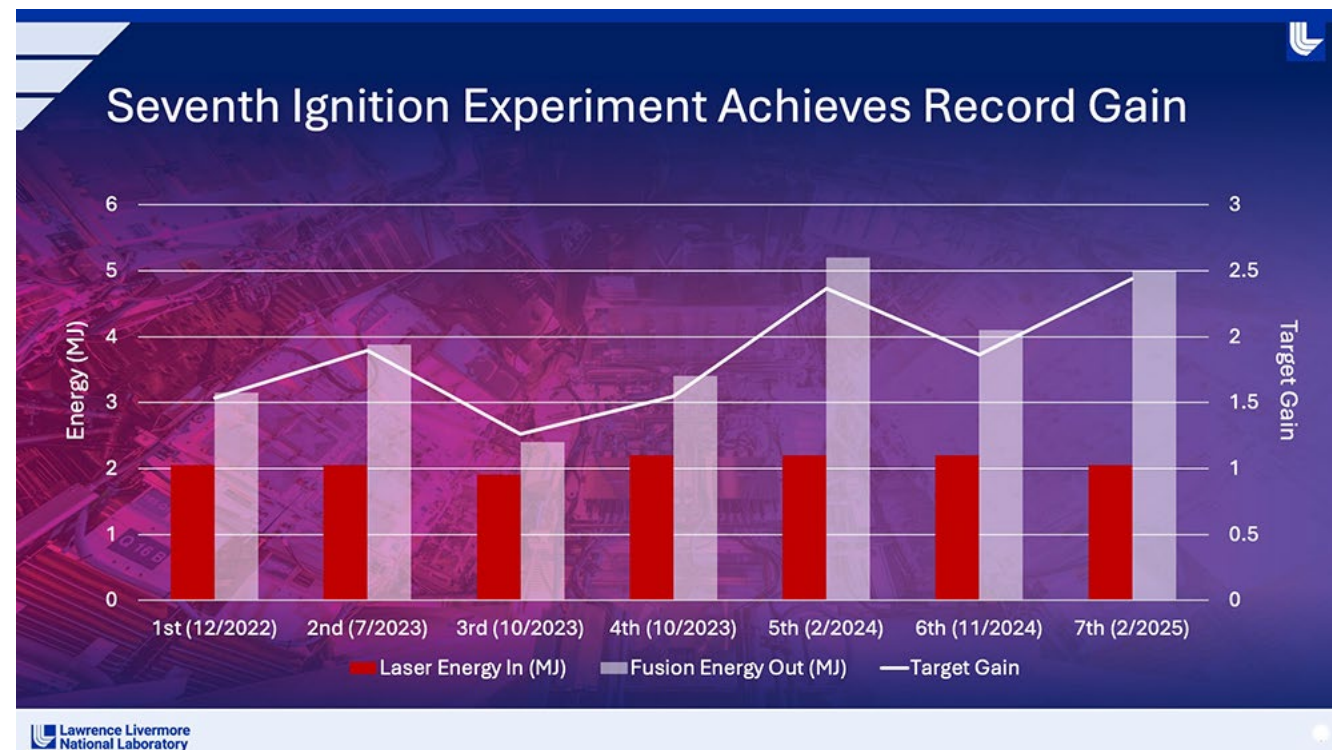
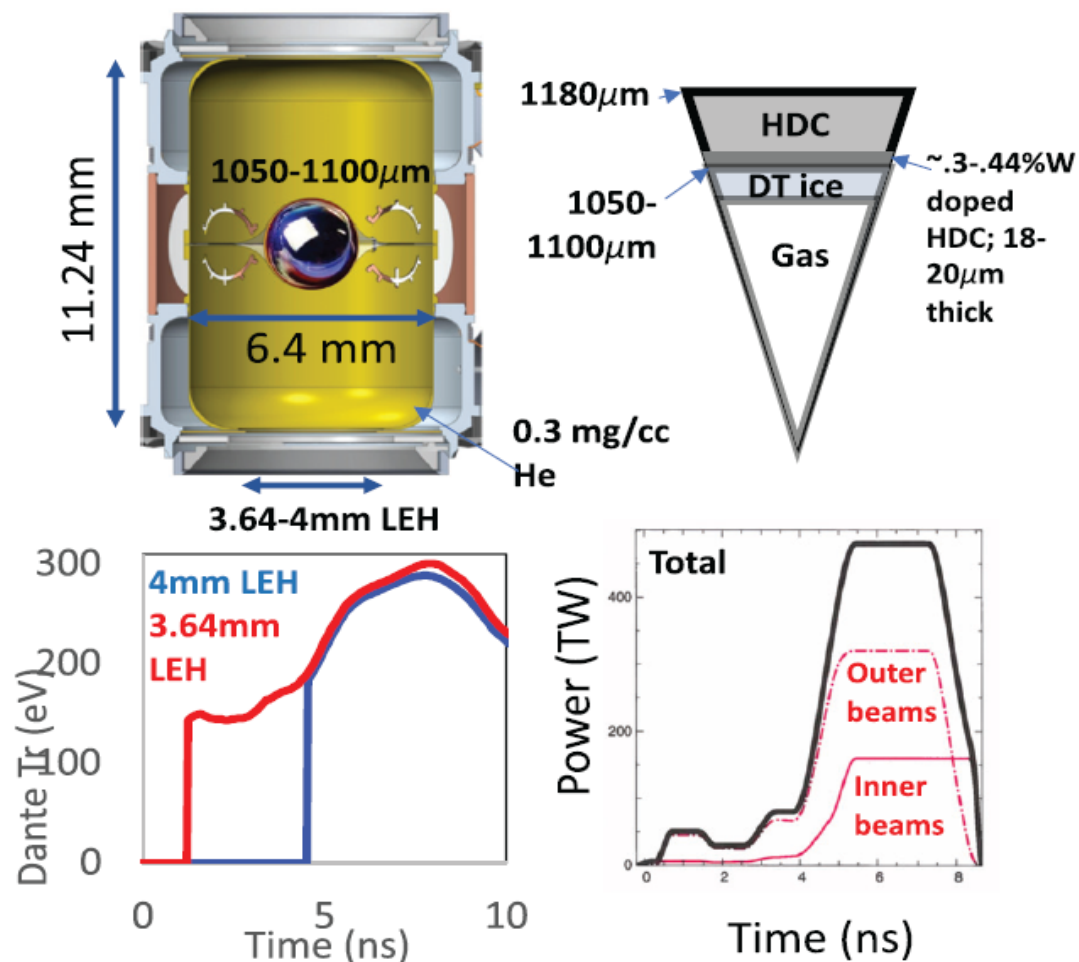
XVII Международной конференции «Забабахинские научные чтения»  
(19– 23 мая 2025, Снежинск).

И.А Химич, В.А. Лыков и Г.Н. Рыкованов

# Эксперименты на NIF с положительным выходом т.я. энергии



РФЯЦ-ВНИИТФ  
РОСАТОМ



Коэффициент усиления по энергии в рекордных опытах на NIF с мишенями непрямого облучения

# Введение



РФЯЦ-ВНИИТФ  
РОСАТОМ

В работе [1] опубликованы результаты 3D-моделирования конверсии лазерного излучения в рентгеновское в сферическом боксе, предназначенное для сжатия мишени непрямого облучения. Эти расчеты были выполнены для проектных параметров Российской мегаджоульной лазерной установки в предположении, что 48 лазерных пучков будут вводить внутрь сферического бокса через 6 отверстий при сохранении полной симметрии куба [1].



Монтаж мишенной камеры в г. Сарове  
(<https://nn.mk.ru/social/2019/04/24>)

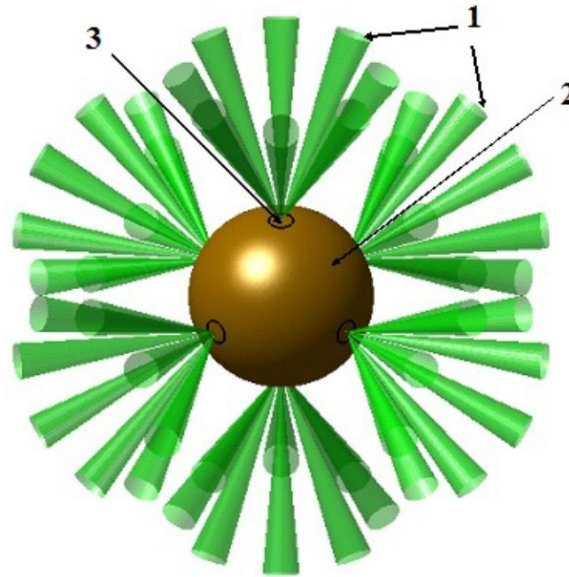
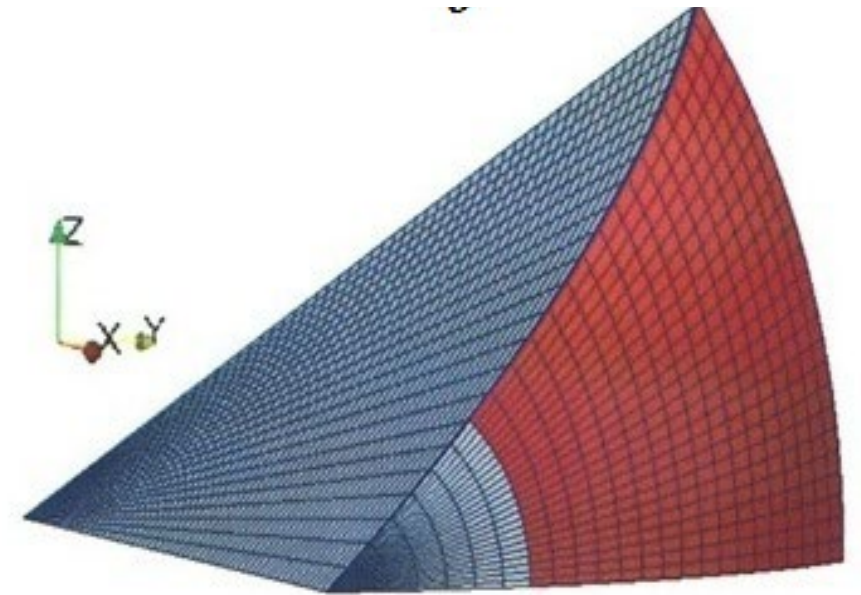
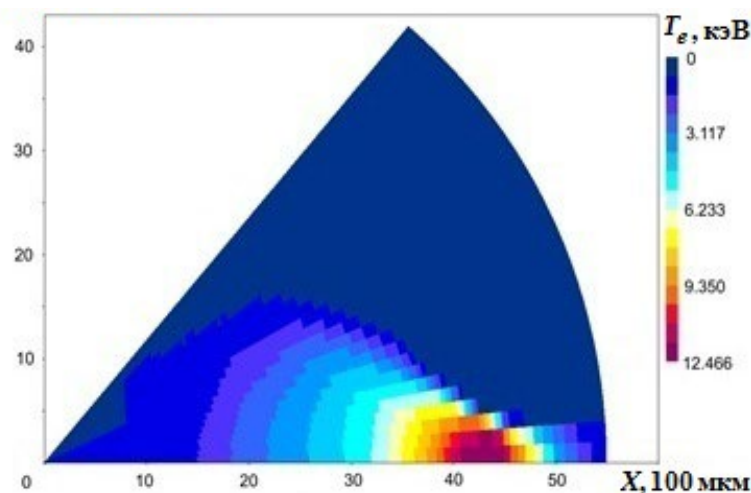


Схема облучения [1]

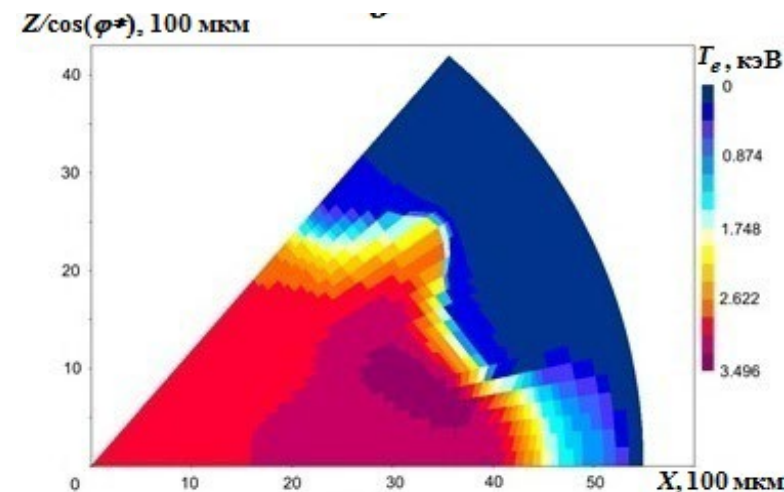


Расчетная сетка в 3D-расчетах [1]

В статье [1] отмечено: “Как показали проведенные трехмерные расчеты, значительная часть лазерного излучения поглощается во внутреннем объеме бокса вблизи отверстий ввода, в плазме, «испаренной» излучением со стенок бокса..., что может привести к снижению симметрии рентгеновского излучения в центре бокса по сравнению со случаем, когда все лазерные пучки доходит до стенки бокса.»



Распределение температуры электронов  
в боксе для мишени с СН-аблятором [1]



Распределение температуры электронов  
в боксе для мишени с HDC-аблятором [1]

Трудности в обеспечении условий термоядерного зажигания мишеней как прямого [2], так и непрямого облучения [1] для проектных параметров Российской мегаджоульной лазерной установки стимулирует поиск альтернативных путей достижения этой цели.

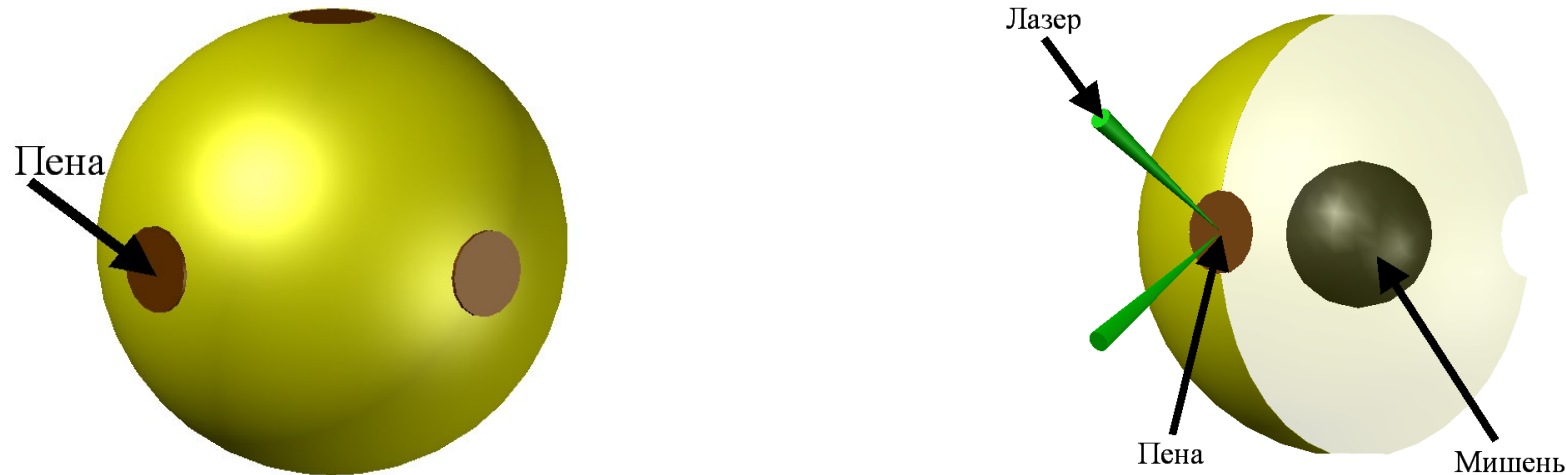
1. Бондаренко С.В. и др. // ВАНТ сер. Мат. мод. физ. процессов. – 2020. – Вып. 3. – С. 11-22.
2. Бакуркина Е.С. И др. // Ядерная физика и инжиниринг. – 2019. – Том 10, №3. – С. 271-284.

# Новый вариант схемы прямого-непрямого облучения мишеней ИТС



РФЯЦ-ВНИИТФ  
РОСАТОМ

Термин «direct-indirect» впервые введен в работе [1], где предложено окружать сферическую мишень через вакуумный зазор тонкой оболочкой из золотой фольги, облучаемой снаружи лазерным излучением. Расчеты и эксперименты [1] указывают, что эффективность преобразования энергии лазерного излучения в односторонний поток теплового излучения с тыльной стороны конвертера может достигать  $\nu \approx 40\%$ . В работе [2] в качестве конвертера предложено использовать малоплотные композиционные материалы.



**Новая схема прямого-непрямого облучения мишеней внутри бокса с круговыми конвертерами**

**Основное преимущество новой конструкции бокса с конвертерами (фольга или пена из материала с большим  $Z$ ) – отсутствие проблем, связанных с запуском лазерного излучения внутрь бокса через отверстия. Недостатком новой схемы является увеличение потерь лазерной энергии до 60 %.**

1. Eliezer S., et al. // Phys. Lett. A. – 1992. – Vol. 166. – 249-252.

2. С.Ю. Гуськов и Ю.А. Меркульев//Квантовая электроника. – 2001. – Том 31, №4. – С. 311-317.

# Аналитические расчеты поля излучения внутри бокса с круговыми конверторами



РФЯЦ-ВНИИТФ  
РОСАТОМ

Обмен излучением между поверхностями описывается уравнением энергетического баланса их малых участков, отнесенных к единичной поверхности [1]:

$$u(\vec{r}, t) = f(\vec{r}, t) - q(\vec{r}, t) + \iint_{S_{\text{вид}}} u(\vec{r}', t - \frac{L}{c}) \frac{\cos(\gamma) \cos(\gamma')}{\pi L^2} d\vec{r}'$$

Здесь:  $u = \sigma T^4$  – удельный (на единицу поверхности) поток энергии излучения,  $T$  – температура поверхности в эВ,  $\sigma = 1,03 \cdot 10^5$  Вт/(см<sup>2</sup>·эВ<sup>4</sup>) – постоянная Стефана-Больцмана,  $\vec{r}$  – координата,  $S_{\text{вид}}$  – видимая из точки часть поверхности,  $f$  – удельный источник излучения – совокупность горячих пятен на поверхности конвертера,  $q$  – удельное поглощение,  $L$  – расстояние между точками  $\vec{r}$  и  $\vec{r}'$ ,  $\gamma$  и  $\gamma'$  – углы между направлением  $L$  и нормалью к поверхностям в этих точках (см. рисунок 1).

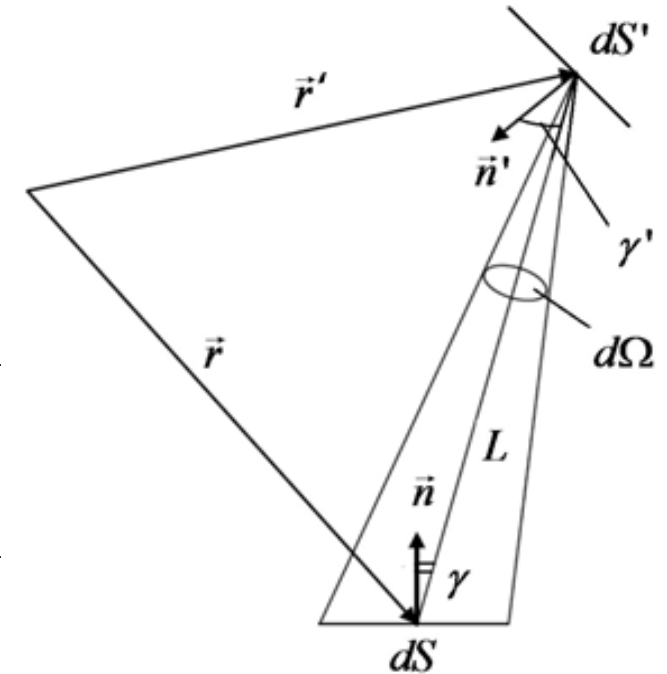


Рисунок 1

# Аналитические расчеты поля излучения... (продолжение 1)



РФЯЦ-ВНИИТФ  
РОСАТОМ

В стационарном приближении решалась задача о нахождении поля теплового излучения внутри сферического бокса с круговыми конверторами, нагреваемыми снаружи лазерными пучками мегаджоульной установки. Решение искалось посредством разложения удельного потока, источников и функции стока излучения по сферическим функциям аналогично работе [1].

Для амплитуд удельного потока излучения была получена система алгебраических уравнений:

$$\begin{cases} u_{nm} = \alpha_M \hat{u}_{nm} A_n \\ \hat{u}_{nm} = \alpha_B (\hat{u}_{nm} B_n + u_{nm} k^2 A_n) + f_{nm} - g_{nm} \end{cases}$$

где  $\alpha_M$  и  $\alpha_B$  – альбедо мишени и бокса, соответственно,  $k=R_M/R_B$ ,

$u(\theta, \varphi) = \sum_n \sum_{m=-n}^n u_{nm} Y_{nm}(\theta, \varphi)$ ,  $\hat{u}(\theta, \varphi) = \sum_n \sum_{m=-n}^n \hat{u}_{nm} Y_{nm}(\theta, \varphi)$  – разложение по сферическим функциям удельного потока излучения с поверхности мишени  $u$  и конвертера  $\hat{u}$ ,

$$f_{nm} = \frac{1}{R^2} \sum_i p_i \zeta_{ni} Y_{nm}^*(\theta_i, \varphi_i), \zeta_{ni} = \frac{\int_0^{\vartheta_i} I_i(\tilde{\theta}) P_n(\cos \tilde{\theta}) \sin \tilde{\theta} d\tilde{\theta}}{\int_0^{\vartheta_i} I_i(\tilde{\theta}) \sin \tilde{\theta} d\tilde{\theta}}$$

– разложение источников по сферическим функциям, где  $2\vartheta_i$  – угол раствора  $i$ -го пятна,  $p_i$  – мощность  $i$ -го пятна,  $I_i$  – яркость  $i$ -го пятна.

$$A_n = 2 \int_k^1 P_n(x) \frac{(x-k)(1-kx)}{(1+k^2-2kx)^2} dx, B_n = 0,5 \int_{2k^2-1}^1 P_n(x) dx$$

Связь  $p_i$  и  $I_i$  задается следующей формулой:  $\int_0^{\vartheta_i} I_i(\tilde{\theta}) \sin \tilde{\theta} d\tilde{\theta} = \frac{p_i}{2\pi R^2}$



$$g_{nm} = \frac{2\pi}{2n+1} \frac{\hat{u}_0}{\sqrt{4\pi}} (\alpha_B - \alpha_K) (1 - \alpha_M k^2) \sum_{i=1}^M Y_{nm}^*(\theta_i, \varphi_i) [P_{n-1}(\cos \vartheta_{oi}) - P_{n+1}(\cos \vartheta_{oi})] \quad - \text{функция стока излучения,}$$

где  $2\vartheta_{oi}$  – угол раствора  $i$ -го конвертора,  $\alpha_M$ ,  $\alpha_B$ ,  $\alpha_K$  – альбедо мишени, бокса и конвертеров, соответственно.

Асимметрия потока излучения на мишени характеризуется относительным среднеквадратичным отклонением и отклонением потока от среднего значения.

Поток излучения, падающий на мишень есть:  $j_{nm} = \hat{u}_{nm} A_n$ .

Тогда относительное среднеквадратичное отклонение падающего потока на мишень:

$$\delta = \sqrt{\frac{j_{nm}^2}{j_0^2} - 1}$$

а отклонение потока от среднего значения:

$$\eta = \frac{\max(j_{nm}) - \min(j_{nm})}{2\bar{j}}$$

Также, как одна из характеристик, интересен гармонический состав асимметрии:

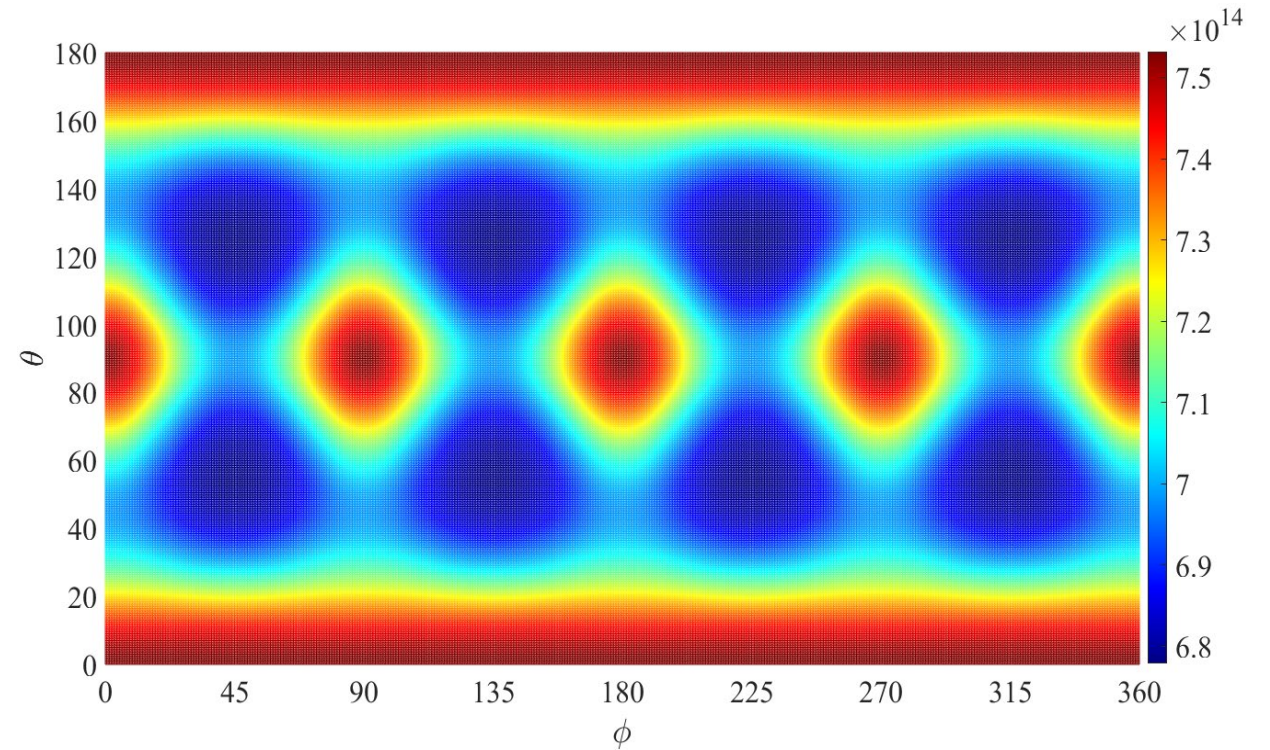
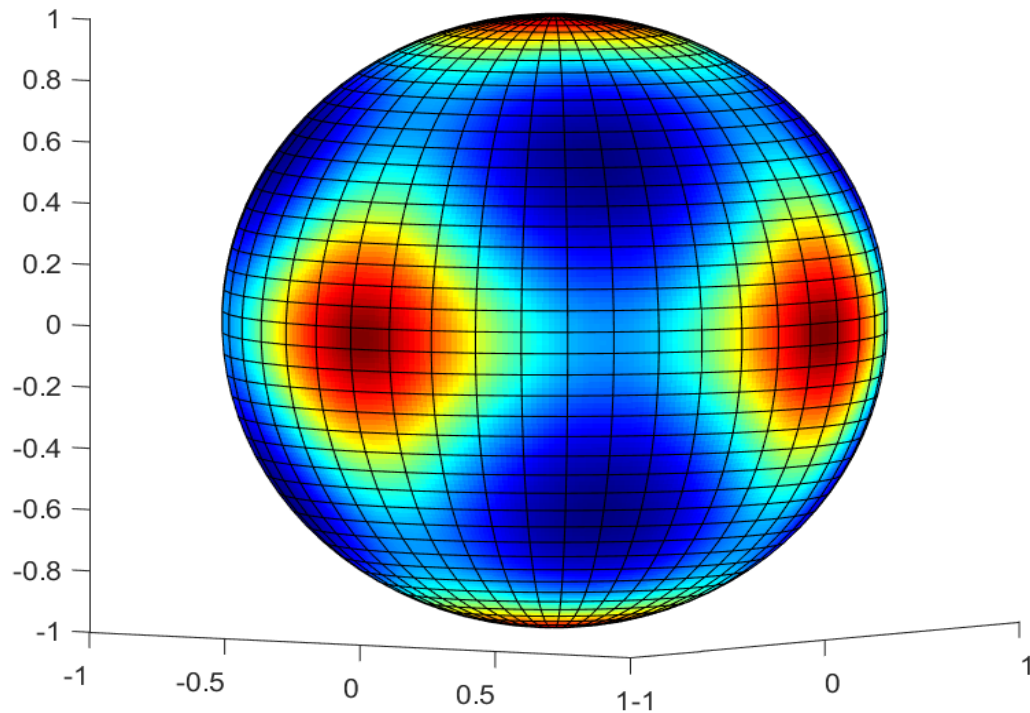
$$\delta_n = \sqrt{\frac{\sum_m j_{nm}^2}{m j_0^2}}$$

# Расчеты поля излучения для 6-ти конверторов



РФЯЦ-ВНИИТФ  
РОСАТОМ

Расчеты проведены для 6-ти конверторов, расположенных в центре граней воображаемого куба.

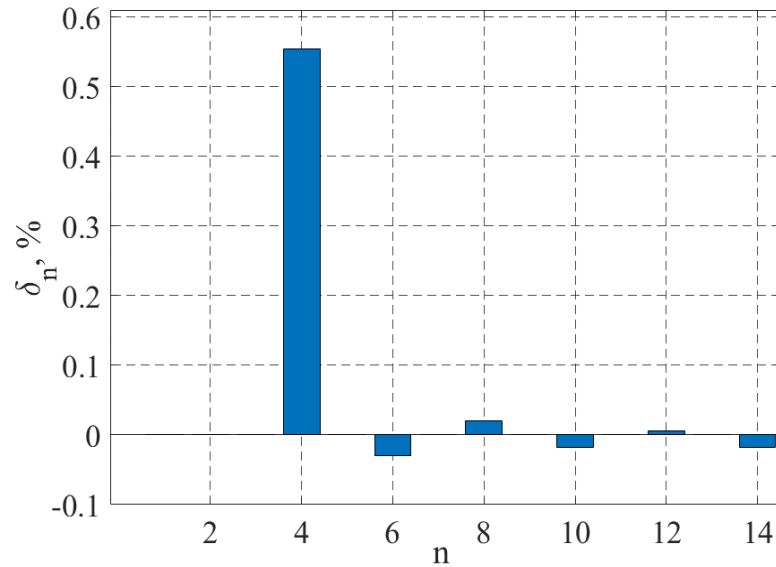


Распределение потока излучения на мишени для  $k=1/4$ ;  $S_K=16$  %;  $\alpha_M=0,25$ ;  $\alpha_B=0,85$ ;  $\alpha_K=0,7$ . Слева – на единичной сфере, справа – развертка на плоскости.

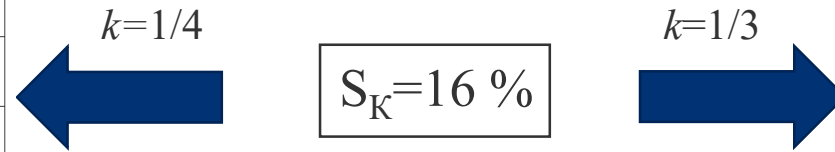
# Гармонический состав асимметрии облучения мишени для 6-и конверторов



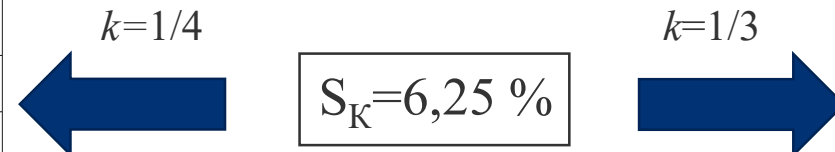
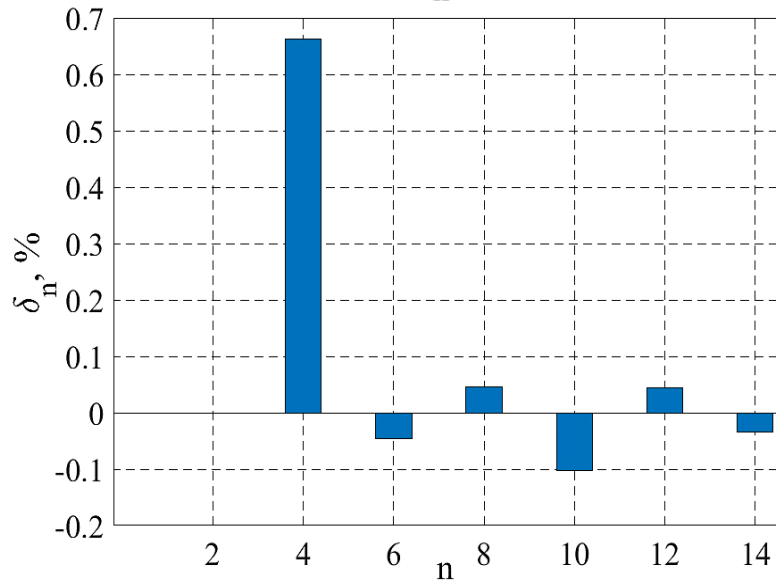
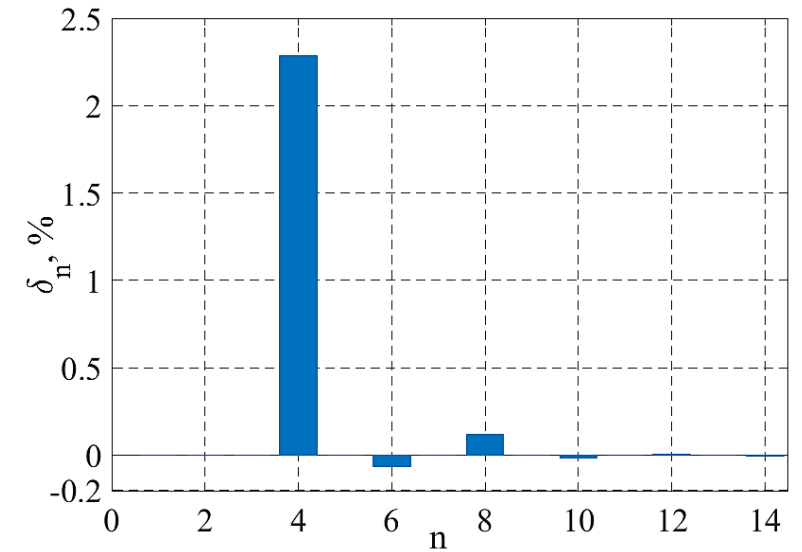
РФЯЦ-ВНИИТФ  
РОСАТОМ



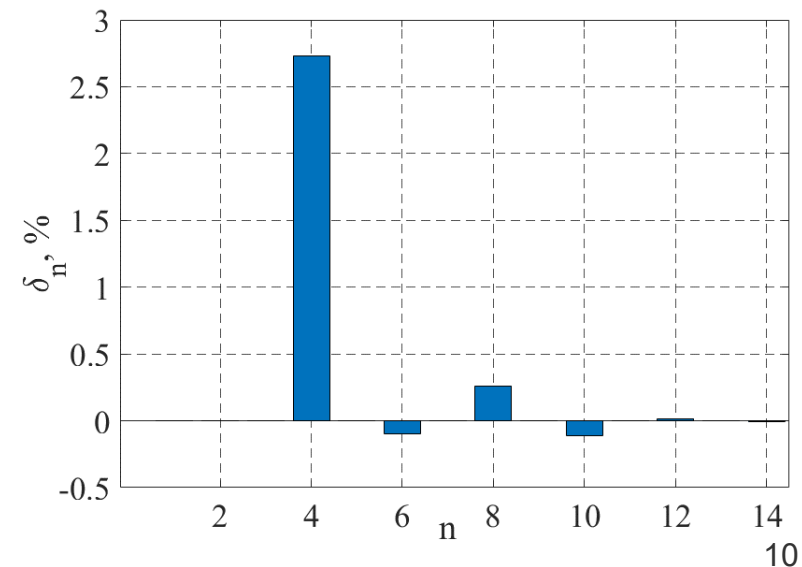
**Уменьшение радиуса бокса  
ухудшает симметрию облучения**



Уменьшение только площади  
конвертеров незначительно влияет на  
асимметрию облучения  
(см. рисунки по вертикали)  
в отличие от изменения отношения  
радиуса мишени к радиусу конвертера  
(см. рисунки по горизонтали)



другие параметры одинаковые:  
 $\alpha_M=0,25$ ;  $\alpha_B=0,85$ ;  $\alpha_K=0,7$ .



# Результаты расчетов для 6-ти конвертеров



РФЯЦ-ВНИИТФ  
РОСАТОМ

|                        |      |      |      |      |      |      |
|------------------------|------|------|------|------|------|------|
| $R_M$ , мм             | 1,1  |      |      |      |      |      |
| $R_B$ , мм             | 4,5  |      |      |      | 3,5  |      |
| $S_K$ , %              | 16   |      | 6,25 |      | 16   | 6,25 |
| $R_K$ , мм             | 1,48 |      | 0,92 |      | 1,14 | 0,72 |
| $\alpha_K$             | 0,70 | 0,30 | 0,70 | 0,30 | 0,70 | 0,70 |
| $T$ , эВ               | 245  | 230  | 250  | 243  | 271  | 275  |
| КПД, %                 | 14,1 | 10,9 | 15,2 | 13,5 | 20,9 | 22,3 |
| КПД <sub>миш</sub> , % | 10,6 | 8,2  | 11,4 | 10,1 | 15,7 | 16,7 |
| $E_{пот}$ , %          | 22   | 39   | 9    | 19   | 19,2 | 8    |
| $\eta$ , %             | 1,02 | 1,02 | 1,25 | 1,25 | 4,63 | 5,55 |
| $\delta$ , %           | 0,56 | 0,56 | 0,68 | 0,68 | 2,29 | 2,75 |

$$КПД = 4\pi R_M^2 \bar{j} / P_L$$

$$КПД_{миш} = 4\pi R_M^2 \bar{j} (1 - \alpha_M) / P_L$$

$$\bar{j} = \frac{\iint j(\theta, \varphi) d\Omega}{4\pi}$$

$j(\theta, \varphi)$  – удельный (на единицу поверхности) поток энергии излучения, падающий на мишень

$P_L = 500 \text{ ТВт}$  – полная мощность лазерного излучения, падающего на конвертер снаружи

$\nu_- \approx 0,4$  – коэффициент конверсии лазерного излучения в поток рентгеновского излучения с тыльной стороны конвертора

Из закона сохранения энергии следует, что поток излучения ( $q_M$ ), падающего на мишень, дается формулой:

$$q_M = \sigma T_{изл}^4 = \frac{\nu_- P_L}{4\pi R_B^2} \times \frac{1}{1 - (1 - (1 - \alpha_M) k^2) [\alpha_B - S_K (\alpha_B - \alpha_K)]}$$

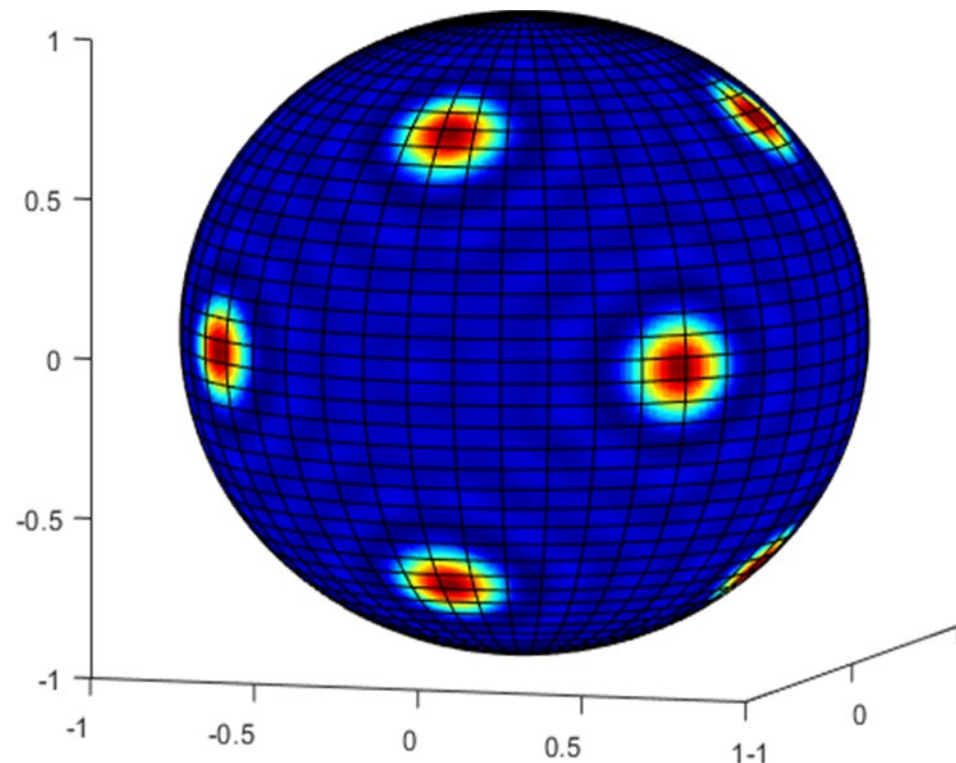
# Объединение кластеров для облучения 12-ти конверторов



РФЯЦ-ВНИИТФ  
РОСАТОМ



Расположение объективов на мишенной камере  
<https://nn.mk.ru/social/2019/04/24>

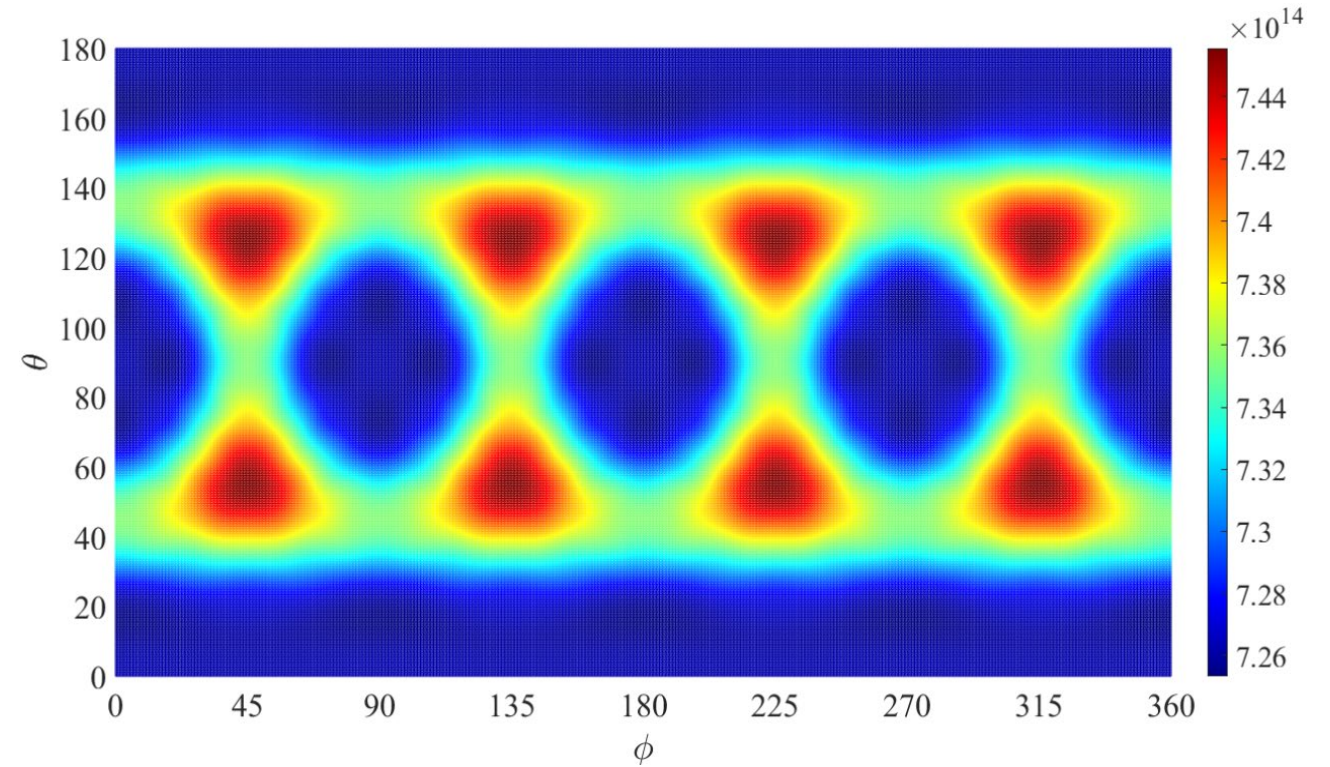
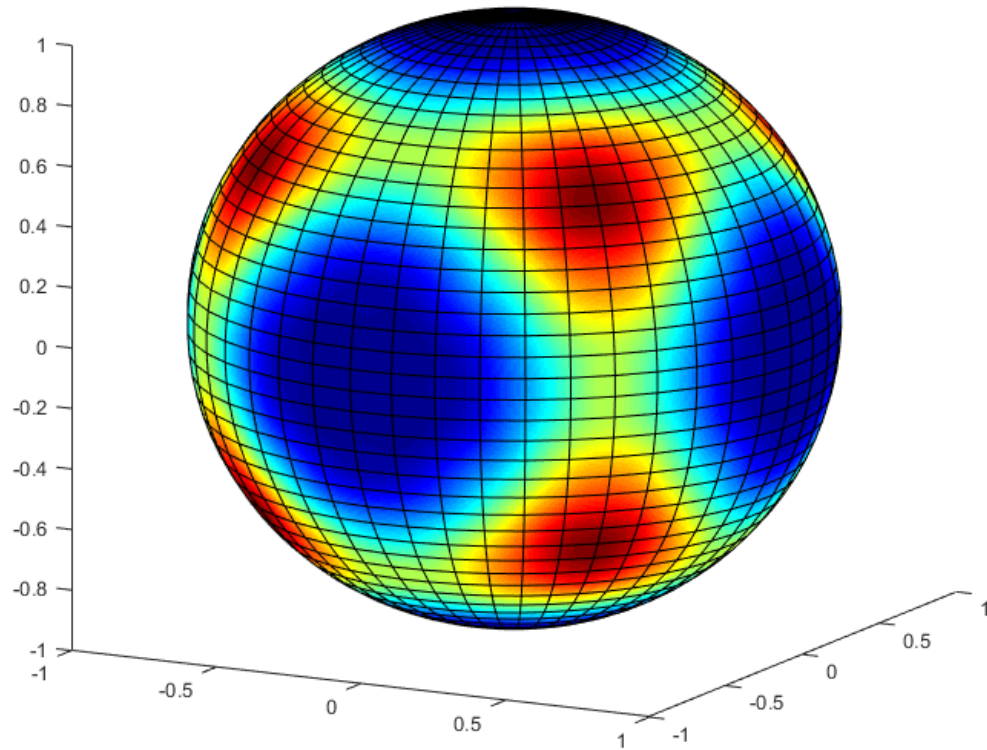


Расположение 12-и конвертеров на боксе ( $S_K=6,25\%$ ).

# Расчеты поля излучения для 12-ти конверторов



РФЯЦ-ВНИИТФ  
РОСАТОМ

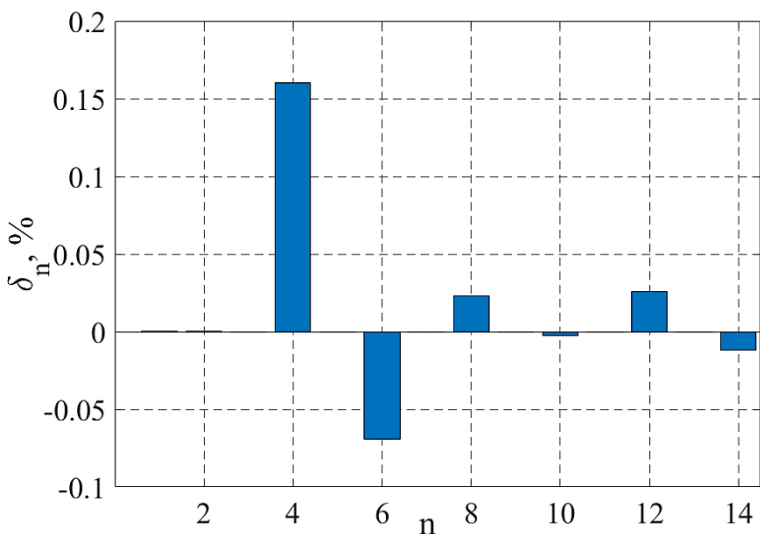


Распределение потока излучения на мишени для  $k=1/3$ ;  $S_K=16\%$ ;  $\alpha_M=0,25$ ;  $\alpha_B=0,85$ ;  $\alpha_K=0,7$ . Слева – на единичной сфере, справа – в развертке.

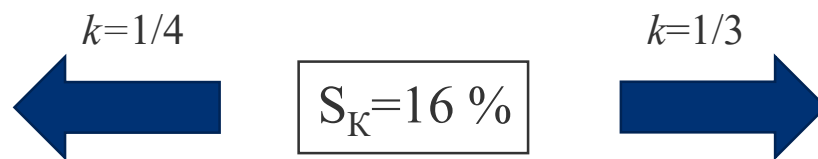
# Гармонический состав асимметрии для 12-ти конверторов



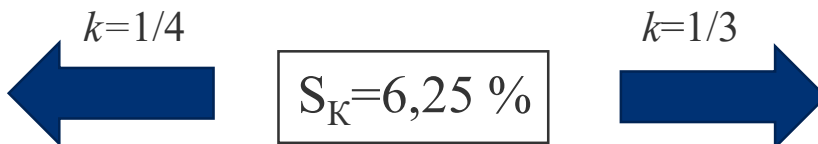
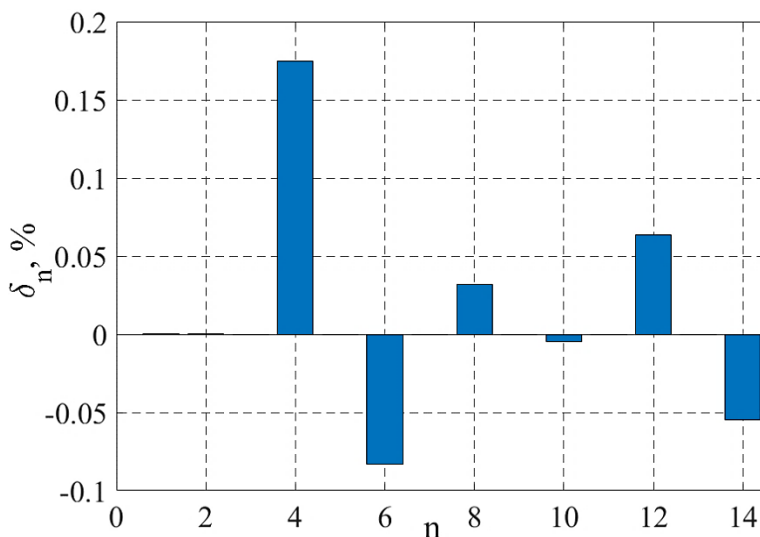
РФЯЦ-ВНИИТФ  
РОСАТОМ



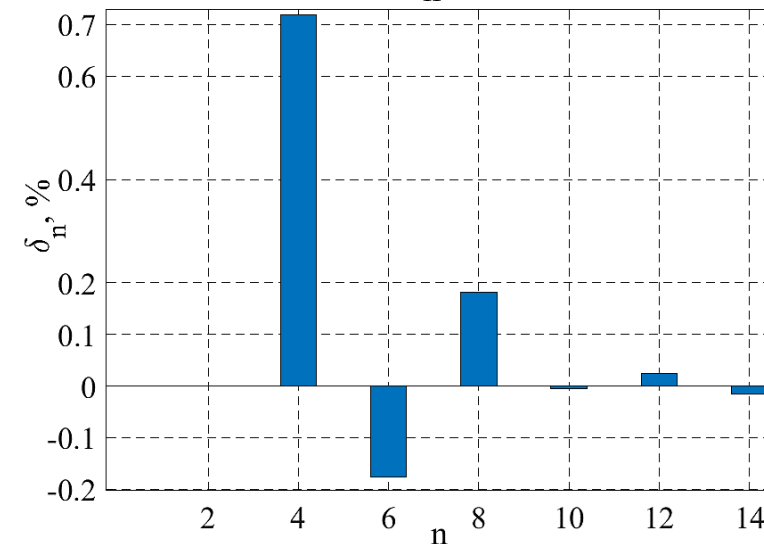
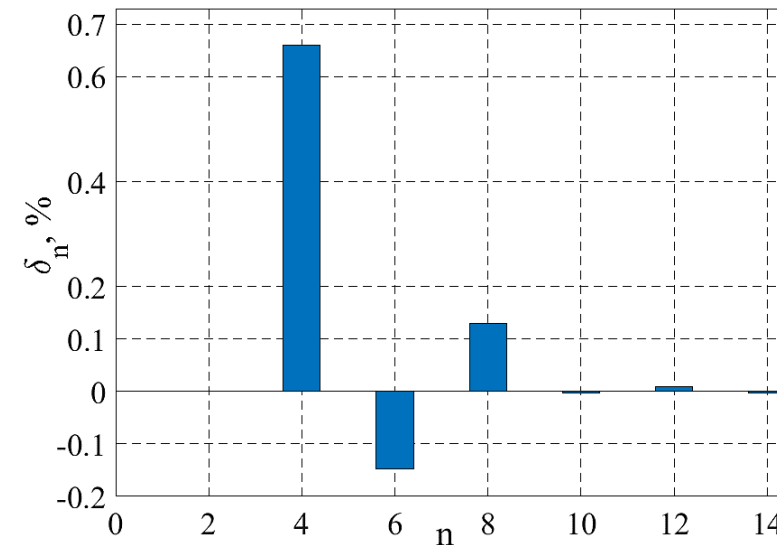
Уменьшение радиуса бокса  
ухудшает симметрию облучения



В отличие от схемы с 6-ю  
конвертерами среднеквадратичное  
отклонение падающего потока на  
мишень остается меньше 1 % и при  
меньшем радиусе бокса



другие параметры одинаковые:  
 $\alpha_M=0.25$ ;  $\alpha_B=0.85$ ;  $\alpha_K=0.7$ .



## Результаты расчетов для 12-ти конвертеров



РФЯЦ-ВНИИТФ  
РОСАТОМ

|                        |      |      |      |      |      |      |
|------------------------|------|------|------|------|------|------|
| $R_M$ , мм             | 1,1  |      |      |      |      |      |
| $R_B$ , мм             | 3,5  |      |      |      | 4,5  |      |
| $S_K$ , %              | 16   |      | 6,25 |      | 16   | 6,25 |
| $R_K$ , мм             | 0,81 |      | 0,51 |      | 1,05 | 0,65 |
| $\alpha_K$             | 0,70 | 0,30 | 0,70 | 0,30 | 0,70 | 0,70 |
| $T$ , эВ               | 271  | 256  | 275  | 268  | 245  | 250  |
| КПД, %                 | 21,0 | 16,7 | 22,2 | 20,2 | 14,1 | 15,2 |
| КПД <sub>миш</sub> , % | 15,7 | 12,5 | 16,7 | 15,1 | 10,6 | 11,4 |
| $E_{пот}$ , %          | 19,2 | 28,0 | 7,80 | 13,0 | 22   | 9    |
| $\eta$ , %             | 1,23 | 1,23 | 1,39 | 1,39 | 0,39 | 0,54 |
| $\delta$ , %           | 0,69 | 0,69 | 0,76 | 0,76 | 0,18 | 0,21 |

### В расчетах:

- **500ТВт** — полная мощность лазерного излучения, падающего на конвертеры,
- **0,4** — коэффициент конверсии лазерного излучения в поток рентгеновского излучения с тыльной стороны конвертора.

- Увеличение числа конвертеров улучшает симметрию облучения мишени.
- Уменьшение радиуса бокса приводит к увеличению температуры излучения до  $T_{изл} \approx 0,27$  кэВ при среднеквадратичном отклонении падающего потока на мишень меньше 1 %.

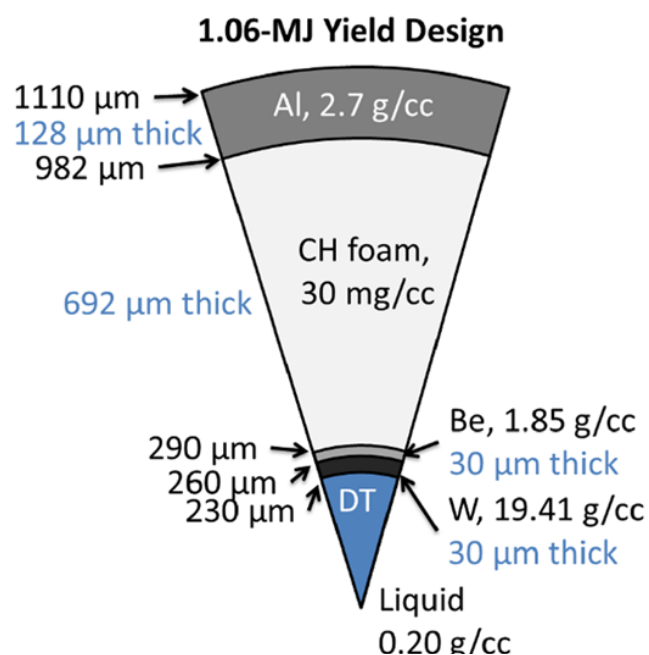
# 1-D расчеты РФЯЦ-ВНИИТФ двухкаскадной мишени



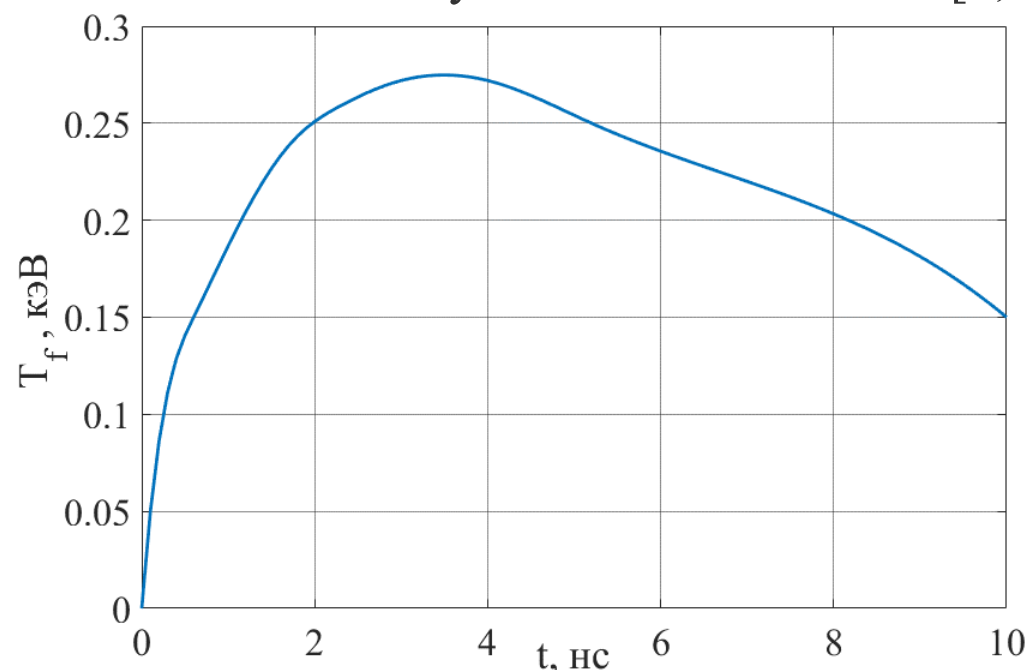
РФЯЦ-ВНИИТФ  
РОСАТОМ

Расчеты, проведенные по 2D- программе радиационной газовой динамики, подтверждают, что при мощности лазера  $P_L=500$  ТВт в боксе новой конструкции может быть достигнута температура излучения  $T_{изл} \approx 0,26-0,28$  кэВ [1].

Такие значения температур наиболее пригодны для сжатия двухкаскадных мишеней [2, 3].



Конструкция двухкаскадной мишени [2]



Зависимость температуры излучения от времени [3]

1. Чубарешко И.С. и др.//Тезисы доклада на XVII Межд. конф. «Забабахинские научные чтения» (19 – 23 мая 2025, Снежинск).
2. Merritt E.C., et al.// Phys. Plasmas 26, 052702 (2019).
3. Amendt P.A., et al. An Ideal Hohlraum Ignition Platform Using Double-Shell Targets. Report at 42nd EPS Conference on Plasma Physics, Lisboan, Portugal, June 23, 2015.

# 1-D расчеты двухкаскадной мишени с учетом перемешивания



РФЯЦ-ВНИИТФ  
РОСАТОМ

Приведены результаты 1D-расчетов двухкаскадной мишени [1] с  $T_f(t)$  из работы [2], выполненных с учетом турбулентного перемешивания и набором констант  $k\epsilon$ -модели [3], которые отвечали двум значениям эмпирического параметра  $\alpha=0,04$  и  $\alpha=0,07$  в выражении для длины проникновения легкого вещества в тяжелое  $L_b = \alpha g t^2$ , где  $A$  – число Аттвуда,  $g$  – ускорение,  $t$  – время.

| № | $\alpha$ | $M_{\text{clean}}, \%$ | $\rho^*, \text{г/см}^3$ | $T_i^*, \text{кэВ}$ | $\rho_{\text{max}}, \text{г/см}^3$ | $T_{i,\text{max}}, \text{кэВ}$ | $W_Q$ | $\eta, \%$ | $N_{\text{DT}}$     |
|---|----------|------------------------|-------------------------|---------------------|------------------------------------|--------------------------------|-------|------------|---------------------|
| 1 | -        | 100                    | 308                     | 3,1                 | 208                                | 3,7                            | 3,1   | 44         | $6 \cdot 10^{17}$   |
| 2 | 0,04     | 34                     | 270                     | 2,2                 | 223                                | 3,3                            | 1,0   | 0,6        | $7,8 \cdot 10^{15}$ |
| 3 | 0,07     | 15                     | 192                     | 1,8                 | 175                                | 2,3                            | 0,49  | 0,1        | $1,4 \cdot 10^{15}$ |

Примечание:  $M_{\text{clean}}$  – доля массы DT, свободного от примесей на момент времени  $t^*$  – максимального сжатия DT;  $\rho^*$  – максимальная плотность и  $T_i^*$  – температура ионов DT на момент  $t^*$  в расчете без учета разогрева топлива продуктами т.я. реакций;  $W_Q$  – запас по зажиганию с учетом потерь энергии в DT-топливе на излучение и электронную теплопроводность [4];  $\rho_{\text{max}}$  – максимальная плотность и  $T_{i,\text{max}}$  – температура ионов DT при горении;  $\eta$  – выгорание трития;  $N_{\text{DT}}$  – нейтронный выход.

Эксперименты с двухкаскадными мишенями непрямого облучения представляют значительный интерес для изучения физики перемешивания вблизи порога термоядерного зажигания [1].

1. Merritt E.C., et al.// Phys. Plasmas 26, 052702 (2019).
2. P.A. Amendt, et al. An Ideal Hohlraum Ignition Platform Using Double-Shell Targets. Report at 42nd EPS Conference on Plasma Physics, Lisbon, Portugal, June 23, 2015.
3. Неуважаев В.Е. Математическое моделирование турбулентного перемешивания, Издательство РФЯЦ-ВНИИТФ, Снежинск, 2007.
4. Бакуркина Е.С. И др. // Ядерная физика и инжиниринг, 2019, том 10, № 3, с. 271–284.

## Заключение



РФЯЦ-ВНИИТФ  
РОСАТОМ

Предложен новый вариант схемы прямого-непрямого облучения мишеней ИТС, когда мишень помещается в центре сферического бокса с круговыми конвертерами, нагреваемыми снаружи лазерными пучками мегаджоульной установки. Основное преимущество новой конструкции – отсутствие проблем, связанных с запуском лазерного излучения внутрь бокса через отверстия, которые существуют в схеме сферического бокса с 6-ю отверстиями.

Проведены аналитические 3D-расчеты поля излучения внутри бокса новой конструкции в предположении, что 48 лазерных кластеров фокусируются на внешней поверхности 6-и или 12-и круговых конвертеров, размещенных в стенках сферического бокса. Обе конфигурации реализуемы при размещении 48-и объективов на изготовленной мишенной камере Российской мегаджоульной лазерной установки.

Расчеты показали, что на поверхности сферической мишени, помещенной в бокс с 12-ю конвертерами, может быть достигнута температура  $T_{изл} \approx 0,26-0,27$  кэВ и однородность излучения на уровне 1-2% при эффективности передачи энергии лазера в сферическую мишень до 15% для проектных параметров Российской мегаджоульной лазерной установки.

По-видимому, предложенная конструкция бокса с круговыми конвертерами наиболее пригодна для изучения физики сжатия двухкаскадных мишеней, которые для своей работы требуют такие значения температур при высокой однородности поля излучения.



## Благодарности

Авторы выражают благодарность Карлыханову Н.Г. и Бакуркиной Е.С. за проведение 1-D расчетов двухкаскадной мишени с учетом спектрального переноса излучения и турбулентного перемешивания по  $k\varepsilon$  -модели.

**Спасибо за внимание!**

