



РОСАТОМ

ГОСУДАРСТВЕННАЯ КОРПОРАЦИЯ ПО АТОМНОЙ ЭНЕРГИИ «РОСАТОМ»



РФЯЦ-ВНИИТФ

Влияние перекачки энергии в пересекающихся пучках на поглощение лазерного излучения в короне мишеней прямого облучения

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

XIV Международная конференция «Забабахинские научные
чтения»

Снежинск, 2019

Содержание

1. Введение
2. Модель поглощения лазерного излучения с учетом СВЕТ
3. Расчет мишени прямого облучения по 1-D программе ЭРА
4. Моделирование мишени прямого воздействия для лазерной установки OMEGA
5. Моделирование мишени прямого воздействия для российской мегаджоульной лазерной установки
6. Выводы

Введение

Эксперименты по лазерному термоядерному синтезу (ЛТС) проводятся уже на протяжении многих лет и были предложены различные подходы для получения термоядерного зажигания. На данный момент рассматриваются две принципиальные схемы: прямое и не прямое облучение. В мишенях с прямым воздействием мишень облучается лазерным излучением непосредственно. При не прямом облучении мишени лазерное излучение конвертируется в рентгеновское при помощи специального бокса. В обоих случаях для проведения экспериментов используются многопучковые лазерные системы, например, NIF[1] и OMEGA[2]. В связи с этим актуальны вопросы взаимодействия лазерного излучения с плазмой при оптимизации мишеней для проведения экспериментов на мегаджоульных лазерных установках. В презентации приводятся расчеты распространения и поглощения лазерного излучения в сферически-симметричной короне мишени прямого облучения. Модель учитывает реальную геометрию облучения мишени на многопучковой лазерной установке и следующие физические процессы: рефракцию и обратно-тормозное поглощение лазерного излучения в геометрико-оптическом приближении [3], передачу энергии в пересекающихся лазерных пучках (cross beam energy transfer - СВЕТ) [4].

Модель поглощения лазерного излучения с учетом СВЕТ

Стационарное взаимодействие двух s-поляризованных световых волн и ионно-звуковой волны рассматривается в пределе сильного затухания. При этом одна волна, называемая пробной, получает энергию, а вторая, волна накачки, отдает энергию. Уравнение для интенсивности пробной волны I_{probe} [4]: $dI_{probe}/dl = I_{probe}/L$, l – путь пробного луча,

$$L^{-1} = \frac{\pi}{\lambda} \frac{n_e/n_c}{\sqrt{1-n_e/n_c}} \frac{1}{\sqrt{v_a^2 \eta^2 + (1-\eta^2)^2}} \left(\frac{I_{pump}}{I_{probe}} \right)^{1/2} |\tilde{n}_e/n_e| - \text{коэффициент усиления вынужденного}$$

Бриллюэновского рассеяния (SBS), $|\tilde{n}_e/n_e| = \frac{e^2 \lambda^2 Z}{\pi m_e^2 c_a^2} \left(\frac{m_e}{M_i} \right) \frac{\sqrt{I_{probe} I_{pump}}}{\sqrt{v_a^2 \eta^2 + (1-\eta^2)^2}}$, где I_{pump} –

интенсивность света накачки. Переменная η включает зависимость от геометрии и частоты взаимодействующих волн, $\eta = (\mathbf{k}_a \mathbf{u} - \omega_a)/k_a c_a$, где \mathbf{u} – скорость потока, ω_a и k_a – частота ионозвуковой волны и волновой вектор соответственно. Взаимодействующие волны удовлетворяют следующим условиям: $\omega_a = \omega_{probe} - \omega_{pump}$, $\mathbf{k}_a = \mathbf{k}_{probe} - \mathbf{k}_{pump}$

Расчет мишени прямого облучения по 1-D программе ЭРА

Для проведения расчетов распространения и поглощения лазерного излучения в короне сферических мишеней с учетом СВЕТ необходимы профили газодинамических величин. Для этого проведены расчеты по программе ЭРА [5] по модели двухтемпературной газовой динамики с электронной и ионной теплопроводностью, учетом переноса излучения в спектральном кинетическом приближении. Также учитывался нелокальный электронный теплоперенос по модели [6], где коэффициент теплопереноса электронов рассчитывается по следующей формуле:

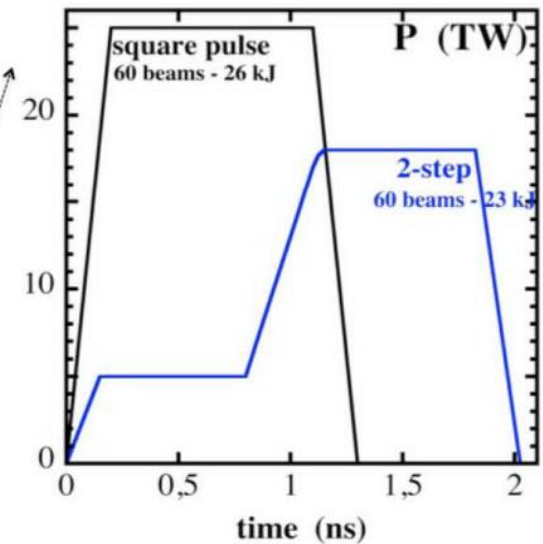
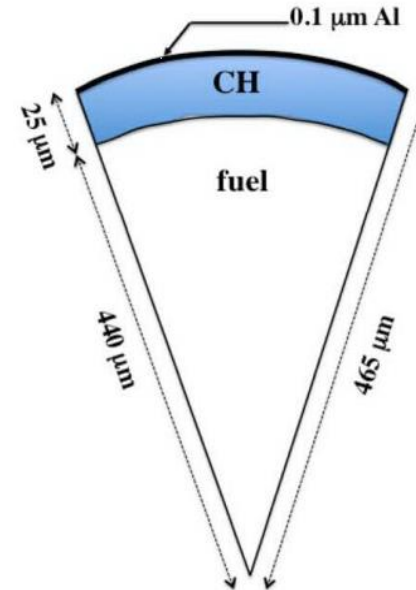
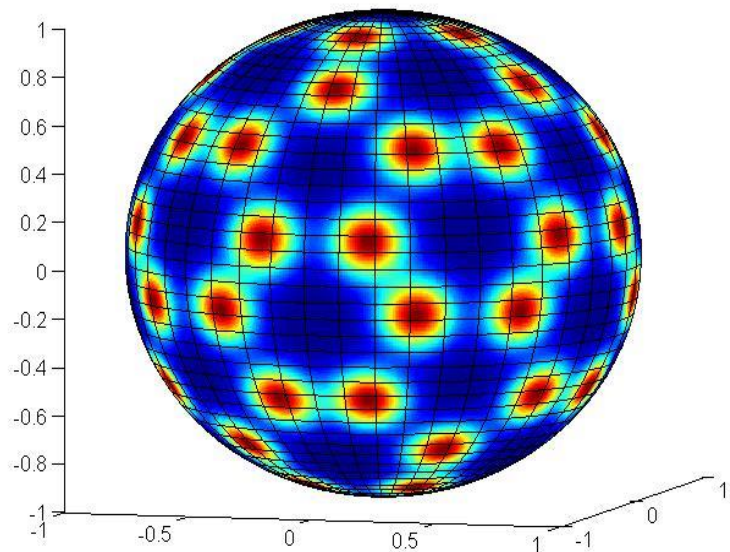
$$q(x) = \int_{-\infty}^{\infty} q_{SH}(x') G(x, x') dx'$$

$$\text{где } G(x, x') = \frac{\xi(\eta(x'))}{\pi a \lambda_e(x')}, \xi(\eta) = \int_0^{\infty} \frac{dp \cos \eta p}{1 + p^{0.9}}, a = 10 \frac{Z + 5}{Z + 12}, \lambda_e = \frac{3T_e^2}{4\sqrt{2\pi} Z n_e e^4 \Lambda}$$

q_{sh} - коэффициент электронного теплопереноса Спитцера-Харма, Z – средний заряд иона, T_e, n_e – температура, концентрация электронов, Λ – кулоновский логарифм.

Моделирование мишени прямого воздействия для лазерной установки OMEGA

Мишень облучалась 60-ю пучками установки OMEGA. Профиль лазерного пучка на мишени имел супер-Гауссовскую форму с показателем $\sim 4,12$ и радиусом ~ 358 мкм по уровню $1/e$ от максимальной интенсивности. Использовались две формы лазерного импульса, приведенные на рисунке 1: «квадратный» импульс с длительностью 1 нс (~ 26 кДж) и «двухступенчатый» импульс (~ 23 кДж) [7].



Мощность лазерного излучения при моделировании поглощения в мишени установки OMEGA

Мощность лазерного излучения,

$$P_L = E_0 f(t) / \int_0^{\infty} f(t) dt$$

где E_0 – энергия лазерного импульса, а $f(t)$ – задана таблицей.

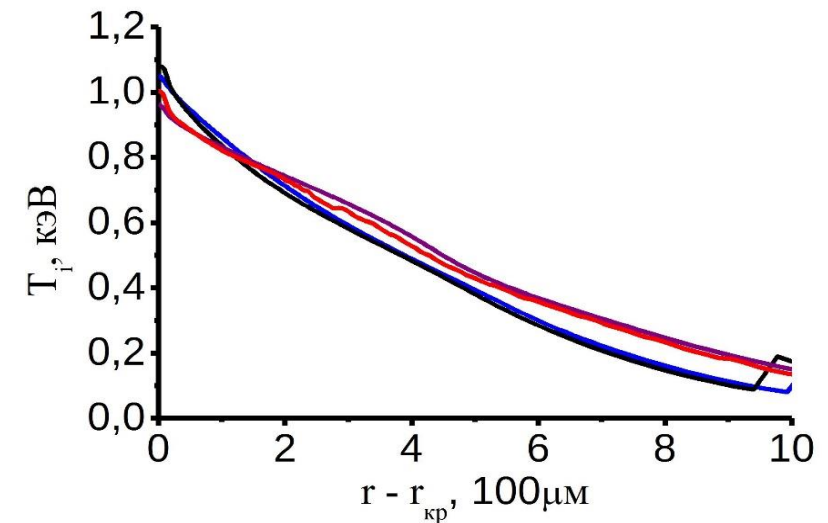
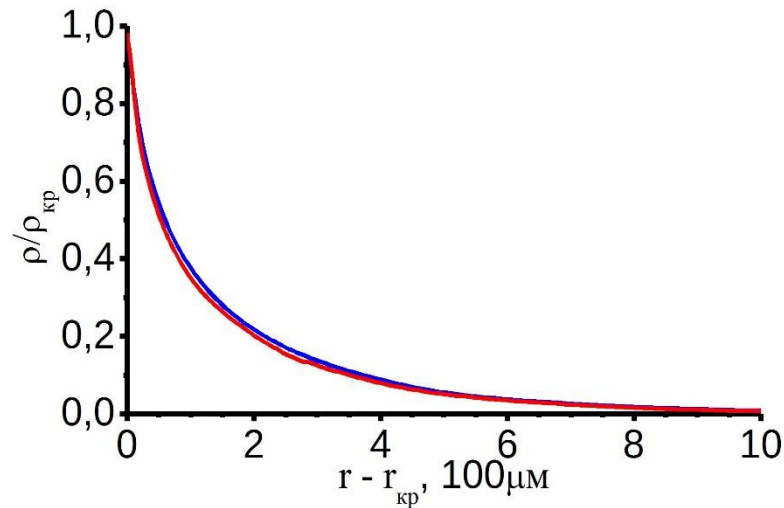
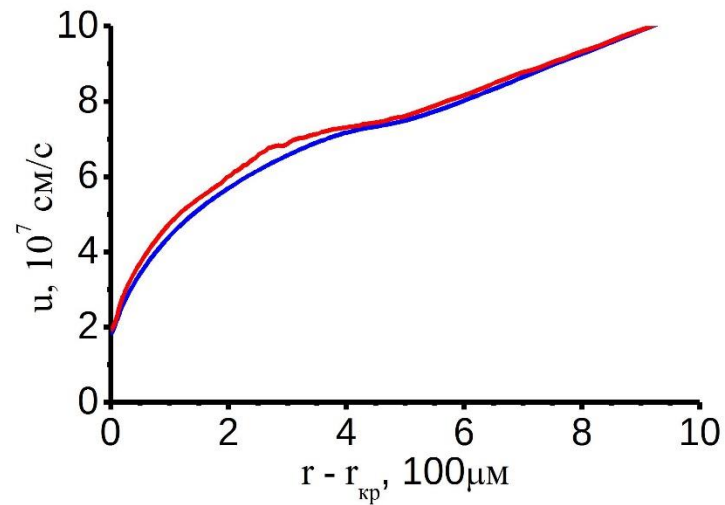
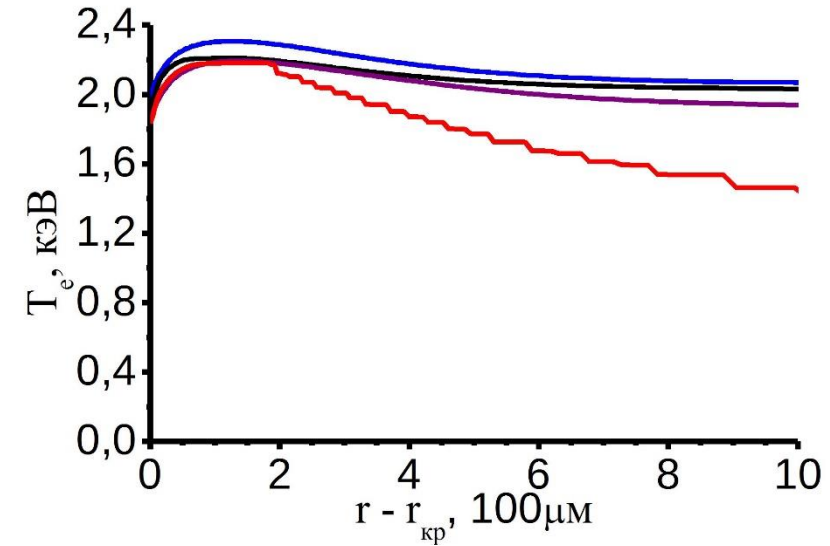
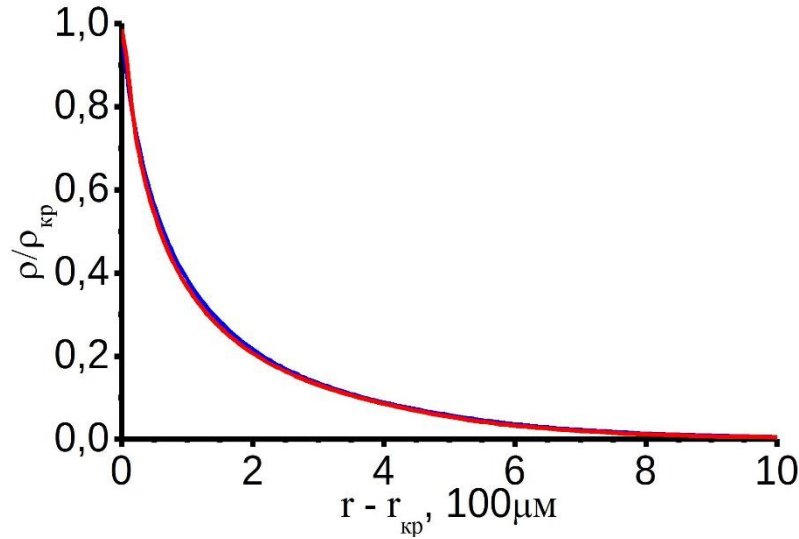
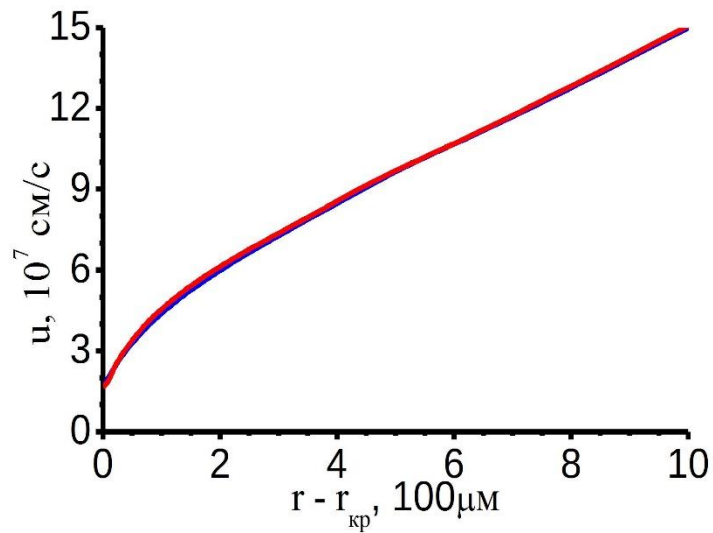
Таблица 1. $f(t)$ для «квадратного» лазерного импульса ($E_0=2.6 \cdot 10^3$ Дж).

t (нс)	0.00	0.20	1.10	1.30	3.00
f(t)	0.00	25	25	0.00	0.00

Таблица 2. $f(t)$ для «двухступенчатого» лазерного импульса ($E_0=2.3 \cdot 10^3$ Дж).

t (нс)	0.00	0.20	1.10	1.30	3.00
f(t)	0.00	25	25	0.00	0.00

Профили u , T_e , T_i и ρ для «квадратного» и «двухступенчатого» импульсов

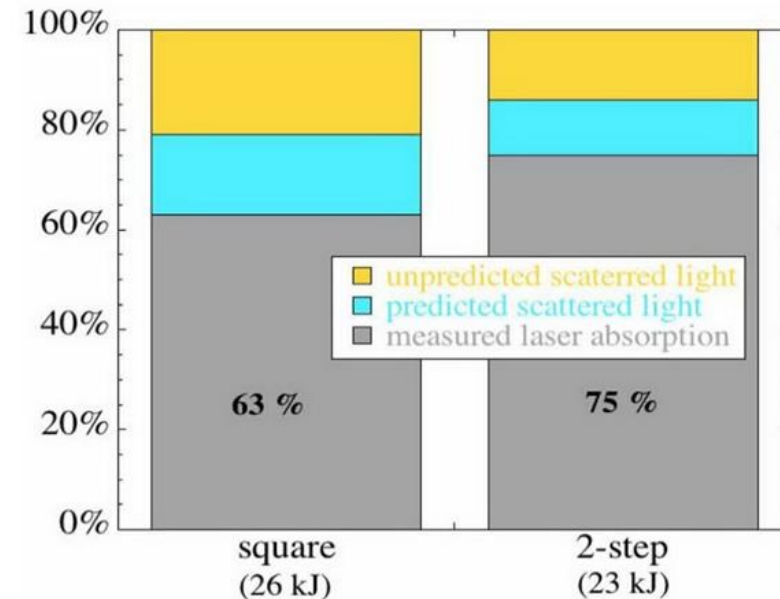


Результаты расчетов поглощения лазерного излучения для установки OMEGA с учетом СВЕТ

Таблица 3. Доля лазерной энергии, поглощенной мишенью в экспериментах [7] и по расчетам с учетом СВЕТ.

Лазерный импульс	Эксперимент	Без учета СВЕТ	С учетом СВЕТ
«квадратный»	63 ± 3	84	66
«двухступенчатый»	75 ± 4	87	73

Как можно видеть, СВЕТ уменьшает долю поглощённой лазерной энергии на 12-20 %. При этом доля поглощённой лазерной энергии с учетом эффекта СВЕТ совпадает с экспериментальной в пределах погрешности.



Моделирование мишени прямого воздействия для российской мегаджоульной лазерной установки

Мишень [8]. Оболочка из СН с внешним радиусом 1.597 мм, толщина стенки 34 мкм и слоем ДТ- льда с плотностью $\rho_{dt}=0.25$ г/см³ и толщиной 149 мкм; в центральной области – ДТ–газ с начальной плотностью $\rho_0=6 \cdot 10^{-4}$ г/см³.

Лазерная система. Расчеты проводились для второй гармоники излучения Nd-лазера, т.е. для длины волны лазерного излучения $\lambda=0,53$ мкм. Предполагалось, что 48 лазерных пучков облучают мишень через оптику с фокальным от-ношением F/8, центр фокусировки – за мишенью на расстоянии 2,4 мм при размере минимального фокального пятна 400 мкм.

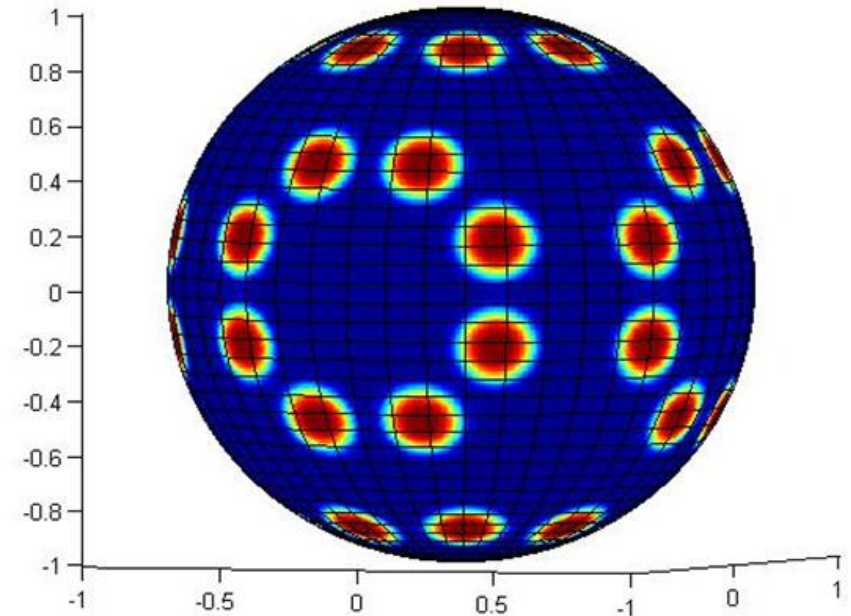


Таблица 4. $f(t)$ лазерного импульса

t	0,0	0,2	3,0	4,00	5,00	5,50	5,75	6,00	9,0	9,1	12,0
F(t)	0,0	6,0	6,0	12,0	40,0	98,0	235	400	400	0,00	0,00

Результаты расчетов с учетом СВЕТ

Таблица 5. Влияние СВЕТ на поглощение лазерного излучения в короне мишени прямого облучения для мегаджоульной установки (профили газодинамических величин взяты из расчета программы ЭРА на момент 8 нс).

	Без учета СВЕТ	С учетом СВЕТ	Self-СВЕТ
A, %	88	47	83

Где A – доля поглощенной лазерной энергии.

Как можно видеть, СВЕТ уменьшает поглощение лазерного излучения на 41%, что существенно уменьшает вероятность зажигания термоядерной мишени. В последнем столбце приведено поглощение с учетом только лишь взаимодействия пучка самого с собой, как верхний предел уменьшения влияния СВЕТ.

Результаты расчетов с учетом СВЕТ при введении сдвига $\Delta\lambda$ длины волны в пучках

Однако проблема СВЕТ может иметь решение. Например, в [9] опубликованы расчеты, которые показывают, что эффект от СВЕТ можно значительно уменьшить при введении смещения длины волны лазерного излучения в соседних лазерных пучках $\Delta\lambda = 10$.

Таблица 6. Изменение поглощения лазерного излучения в короне мишени при введении смещения длины волны в лазерных пучках, в определенном порядке для профиля на 8 нс из расчета ЭРА.

	$\Delta\lambda = 10 \text{ \AA}$	$\Delta\lambda = 10, 20 \text{ \AA}$
A, %	65	75

Где A – доля поглощенной лазерной энергии.

Выводы

- Разработана программа для расчета распространения и поглощения лазерного излучения с учетом рефракции и обратно-тормозного поглощения лазерного излучения, передачи энергии при пересечении пучков (СВЕТ) в короне мишени прямого облучения.
- Расчет поглощения лазерной энергии для установки OMEGA совпал с экспериментальными данными.
- Согласно проведенным расчетам учет процесса СВЕТ значительно увеличивает отражение лазерного излучения для российской установки .
- Возможно уменьшение эффекта СВЕТ путем введения смещения длины волны лазерного излучения в пучка на $\Delta\lambda = 10 - 20 \text{ \AA}$

Список литературы

1. Haynam C.A. et. al. National Ignition Facility laser performance status // Appl. Opt. 2007, 46, 3276.
2. T.R. Boehly et al Opt. Commun. **133** 495 (1997).
3. I.A. Khimich and V.A. Lykov. Book of abstracts of 34th European Conference on Laser interaction with Matter (ECLIM2016), September 19-23, Moscow, Russia. p.113 (2016).
4. I.V. Igumenshchev et al., Phys. Plasmas 19, 056314 (2012).
5. Барышева Н.М. и др., Жур. Выч. Мат. и Мат. Физ.,**22**, 401 (1982).
6. O.V. Batishchev, et al, Phys. Plasmas 9, 2302 (2002).
7. J. L. Laffite, et al., Phys. of Plasmas, 23, 012706 (2016).
8. Бельков С.А. и др., ЖЭТФ, 2015г., том 148, вып. 4.
9. D.H. Edgell, R.K. Follett, I.V. Igumenshchev, J.F. Myatt, J.G. Shaw and D.H. Froula, Physics of Plasmas 24, 062706 (2017).