



РОСАТОМ



ГОСУДАРСТВЕННАЯ КОРПОРАЦИЯ ПО АТОМНОЙ ЭНЕРГИИ

Моделирование нелокального электронного теплопереноса в одномерных расчетах мишеней прямого облучения

Николай Григорьевич Карлыханов,
В.А. Лыков

Введение

Существенным моментом при моделировании мишеней ИТС является необходимость учета нелокальности электронного теплопереноса, когда пробеги электронов становятся сравнимы с характерной длиной, обусловленной градиентом электронной температуры $L_T \approx (d \ln T_e / dx)^{-1}$. Традиционный учет этого эффекта заключается в использовании, так называемого, ограничения электронной теплопроводности, когда Спитцеровский тепловой поток ограничивается предельным потоком: $q_e^* = f n_e T_e \sqrt{T_e / m_e}$, где f – эмпирический коэффициент, который зависит от параметров «лазерной» короны и равен $f \approx 0,06-0,15$.

В программе ЭРА используется модель среднегеометрического осреднения потоков:

$$\tilde{q}_e = \frac{q_e q_e^*}{q_e^* + |q_e|}$$

В настоящее время установлено, что точность данного приближения невелика и единого коэффициента f для всех условий не существует.

Введение

Если нет возможности использовать уравнение Ландау, необходимо применять другие приближенные модели электронного теплопереноса, более точные, чем приближение ограничения предельным потоком. Одна из таких моделей, предложенная в работе [1], была реализована в программе ЭРА.

1. V. Yu. Bychenkov, W. Rozmus, V. T. Tikhonchuk, Nonlocal Electron Transport in a Plasma, Phys. Rev. Lett. 75, 4405 (1995)

Модель нелокального теплопереноса

Для приближенного учета нелокального переноса энергии тепловыми электронами Спитцеровский электронный поток тепла заменяется на интегральную свертку этого потока с функцией Грина по всему пространству:

$$q_{e,NL}(x) = \int_{-\infty}^{\infty} q_{SH}(x') G(x, x') dx' \quad G(x, x') = \frac{\xi(\eta(x'))}{\pi a_e \lambda_e(x')} \quad \xi(\eta) = \int_0^{\infty} dp \frac{\cos(\eta p)}{1 + p^{0,9}}$$

$$\eta = |x - x'| / a_e \lambda_e(x') \quad \lambda_e = \sqrt{\langle Z \rangle^2 / Z} \cdot \lambda_{ei}, \quad \lambda_{ei} = \frac{3T_e^2 \langle Z \rangle}{4\sqrt{2\pi} \langle Z^2 \rangle n_e e^4 \Lambda_{ei}}$$

$$a_e = a_{e0} \frac{\langle Z^2 \rangle + 5 \langle Z \rangle}{\langle Z^2 \rangle + 12 \langle Z \rangle} \quad a_{e0} \approx 10$$

Выражение для данной функции получено аппроксимацией аналитических результатов расчетов нелокальной электронной теплопроводности, полученных в линейном приближении из решения уравнений Ландау. Очевидно, что выражение для $q_{e,NL}$ переходит в Спитцеровский поток, когда выполняются условия применимости приближения электронной теплопроводности.

Тестовая задача № 1

В работе [2] было опубликовано сравнение решений, полученных по приближенной модели нелокального теплопереноса “SNB”, предложенной в работе [3], с решениями уравнений Власова-Фоккера-Планка (VFP) [4] на примере нескольких модельных задач.

В качестве первого теста рассматривалась простая нелинейная задача о тепловом бассейне [2]. В этой задаче был задан начальный профиль электронной температуры в следующем виде:

$$T_e(x, t = 0) = \begin{cases} 1 \text{ кэВ при } 0 < x < 4,0; \\ \text{меняется линейно от } 1 \text{ кэВ до } 0,1 \text{ кэВ при } 4,0 < x < 5,0; \\ 0,1 \text{ кэВ при } 5,0 < x < 7,0; \end{cases}$$

Расчёты проводились в следующих постановках:

1. Учет электронной теплопроводности без ограничения потока и без учета нелокального теплопереноса (Спитцеровская теплопроводность);
2. Учет ограничения электронной теплопроводности по формуле (0.3) с предельным потоком при $f \approx 0,2$, без учета нелокального теплопереноса.
3. Учет нелокального теплопереноса согласно модели.

2. M. Sherlock, J.P.Brodrick and C. P. Ridgers, Phys. Plasmas 24, 082706 (2017).

3. G. P. Schurtz, P. D. Nicolai, and M. Busquet, Phys. Plasmas 7, 4238 (2000)

4. Marocchino, M. Tzoufras, S. Atzeni, A. Schiavi, Ph. D. Nicolai, J. Mallet, V. Tikhonchuk, and J.-L. Feugeas., Phys. Plasmas 20, 022702 (2013).

Тестовая задача № 1

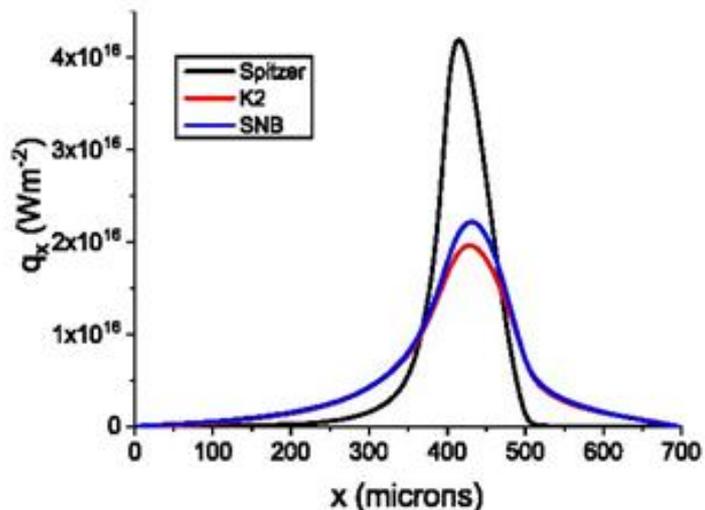


Рисунок 1. Профили электронного потока тепла на момент $t=10$ пс по модели SNB, VFP по программе K2 и со Спитцеровской теплопроводностью.

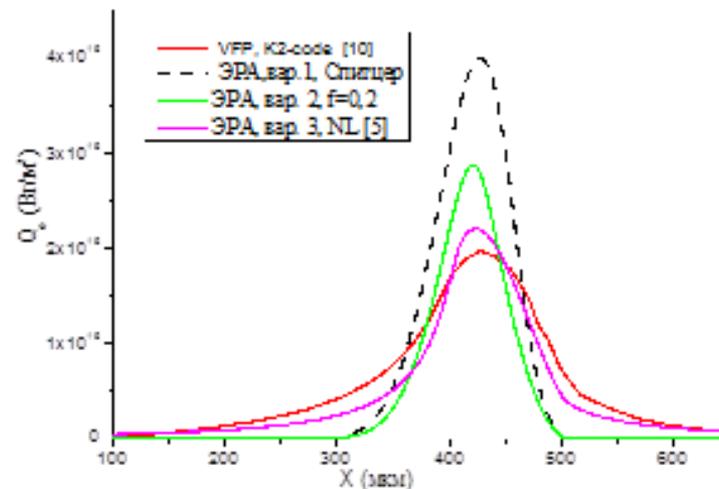


Рисунок 2. Профили электронного потока тепла на момент 10 пс, рассчитанные по модели VFP, модели SNB и результаты расчетов, выполненные по программе ЭРА

Тестовая задача № 2

В работе [5] опубликованы расчеты нелокального электронного теплопереноса, выполненные по двум различным моделям: упомянутой выше модели SND и модели CMG [6].

Постановка задачи:

Профиль плотности меняется линейно на масштабе 0,1 см от 1 г/см³ на левом краю до 10⁻⁴ г/см³ на правой границе. В начальный момент времени температура $T_e(x, t=0) = 0,1$ эВ. На левой границе задана постоянная температура $T_e(x=0, t) = 5$ кэВ, а на правой границе поток тепла равен нулю: $\partial T_e / \partial x = 0$.

5. Marocchino, M. Tzoufras, S. Atzeni, A. Schiavi, Ph. D. Nicolai, J. Mallet, V. Tikhonchuk, and J.-L. Feugeas., Phys. Plasmas 20, 022702 (2013).

6. D. Besnard, G. Bonnaud, and G. Schurtz, La Fusion Thermonucleaire Par Laser, edited by R. Dautray and J. P. Watteau (Eyrolles, Paris 1993), Pt. 3, Vol. 2, p. 1117.

Тестовая задача № 2

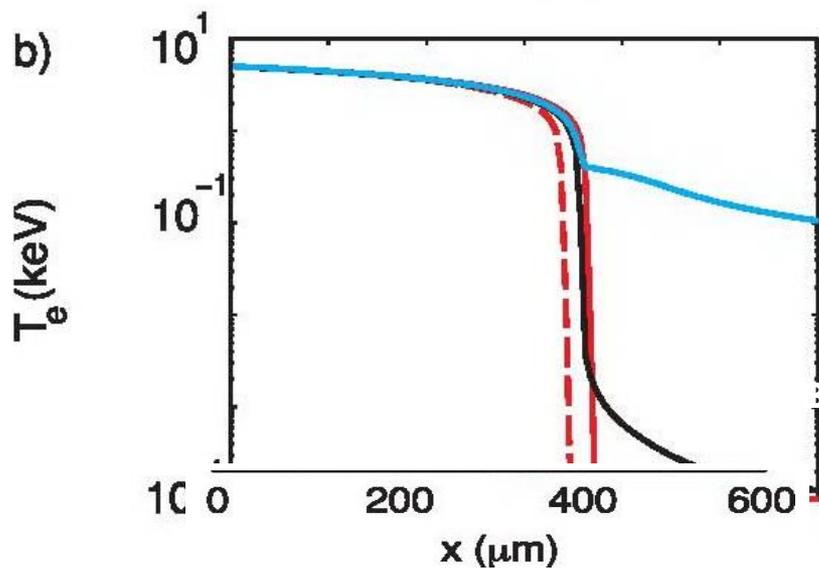


Рисунок 3. Результаты расчетов теста 2 из работы [5]

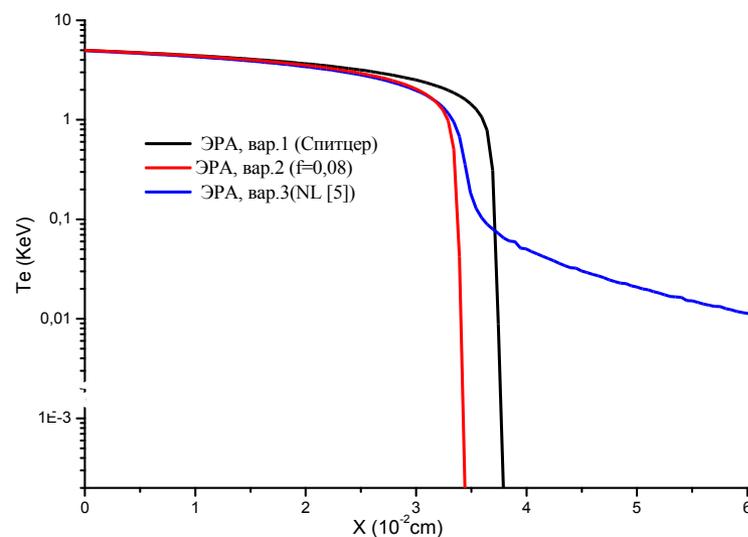


Рисунок 4. Результаты расчетов теста 2 по программе ЭРА

Тестовая задача № 2

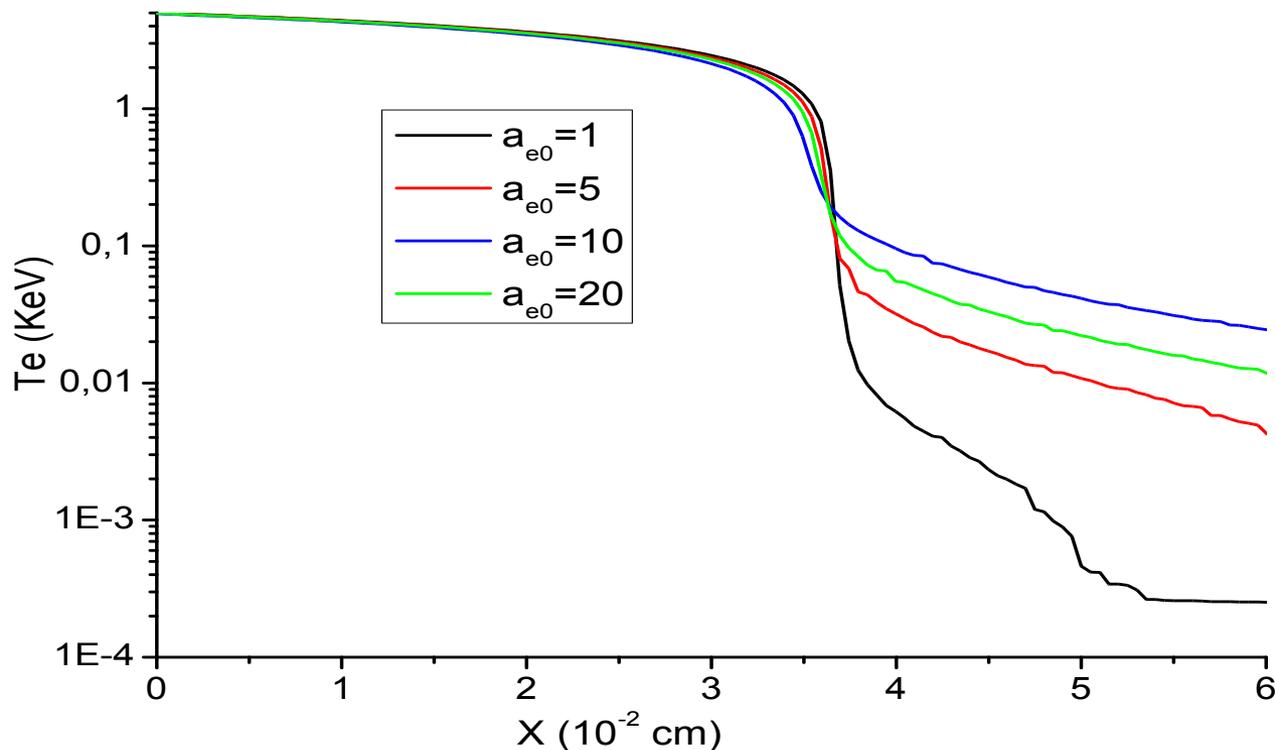
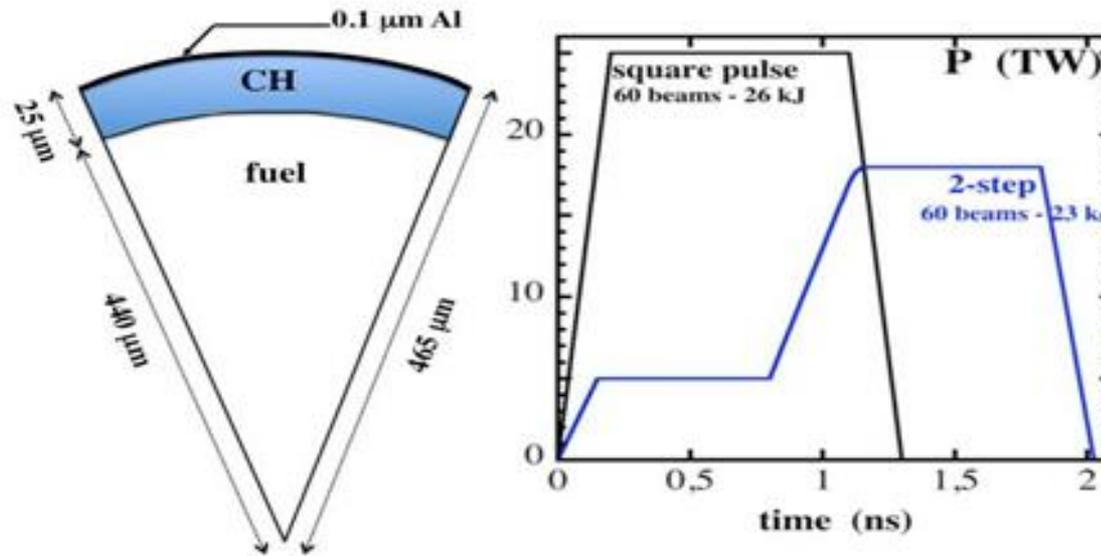


Рисунок 5. Профили температуры из расчетов теста 2 по программе ЭРА при различных значениях параметра a_{e0} модели нелокального теплопереноса

Результаты расчетов опытов на установке ОМЕГА по программе ЭРА с учетом нелокального электронного теплопереноса.



S. Laffite, et al., Time history prediction of direct-drive implosions on the Omega facility, *Physics of Plasmas* 23, 012706 (2016)

Результаты расчетов опытов на установке OMEGA по программе ЭРА с учетом нелокального электронного теплопереноса.

	NL	f	ξ_B	K_a %	T_{qc} КэВ	t_{0n} нс	N_{dt} 10^{12}	T_i КэВ	ρ_{max} г/см ³
OMEGA-1				60-66	2,2-2,4	1,9-2,2	~3	-	-
1	-	0,15	2	64	2,29	2,04	11	2,4	7,8
2	+	-	2	64	2,2	2,03	8	2,3	6,3
3	+	-	0	85	2,6	1,74	30	3,3	6,7
OMEGA-2				71-79	-	2,6-2,9	~2	-	-
4	-	0,15	2	75	2,33	2,62	14	2,4	11
5	+	-	2	75	2,38	2,6	16	2,5	10
6	+	-	0	96	2,75	2,36	41	3,2	11

Здесь: NL – учет/неучет нелокального электронного теплопереноса;

f - коэффициент в выражении для предельного электронного потока тепла;

ξ_B - параметр в выражении для линейного коэффициента ВРМБ;

K_a – доля энергии ЛИ, поглощенной мишенью;

T_{qc} – температура электронов в области $\rho_{c/4}$ на моменты $t_1 \sim 1$ нс – для «прямоугольного» и $t_2 \sim 1,9$ нс – для 2-х ступенчатого лазерного импульса;

t_{0n} - момент максимальной скорости генерации нейтронов от начала облучения;

N_{dt} - нейтронный выход; T_i - максимальная температура ионов ДТ-топлива;

ρ_{max} – максимальная плотность ДТ-топлива;

Результаты расчетов опытов на установке OMEGA по программе ЭРА с учетом нелокального электронного теплопереноса.

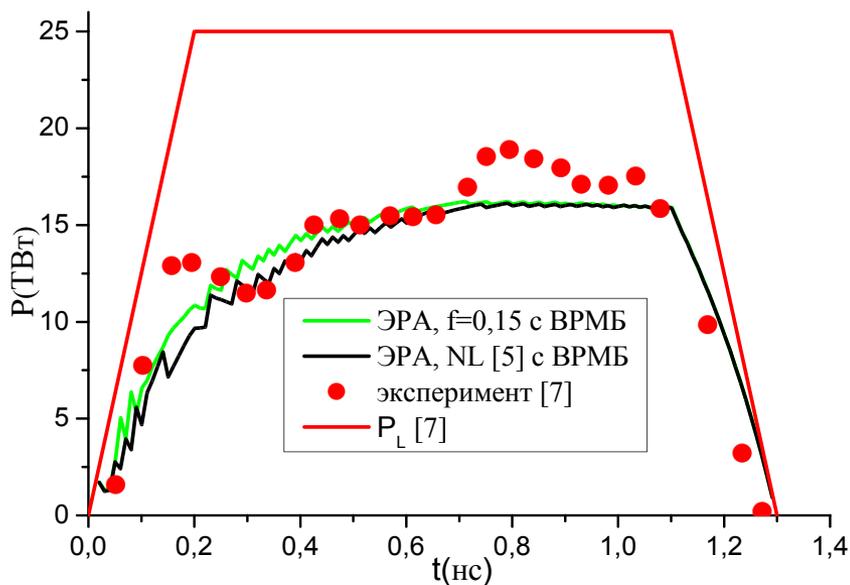


Рисунок 11 - Поглощенная лазерная мощность от времени. Эксперимент - красные точки; ЭРА с ограничением потока ($f=0,15$) и учетом ВРМБ - зеленая линия; ЭРА с учетом нелокального теплопереноса и ВРМБ - черная линия; мощность лазерного излучения от времени - красная линия.

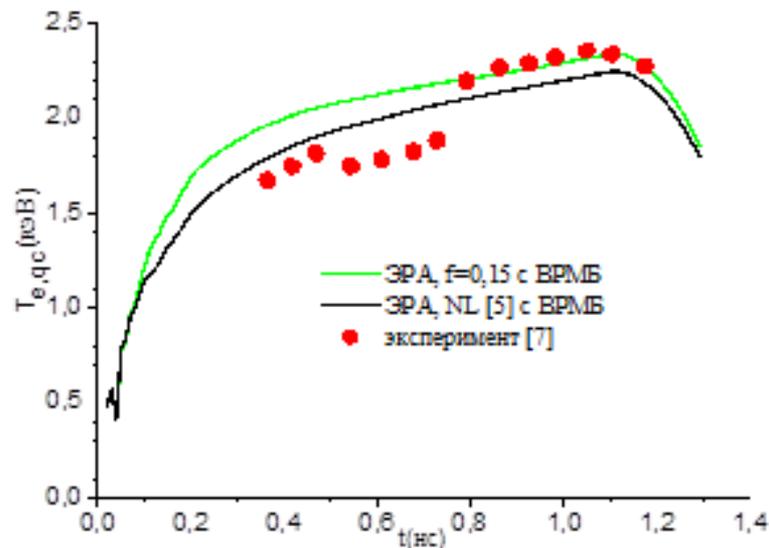


Рисунок 12- Зависимость от времени температуры электронов в области $\rho_c/4$. Обозначения - как на рисунке 11

Результаты расчетов опытов на установке ОМЕГА по программе ЭРА с учетом нелокального электронного теплопереноса.

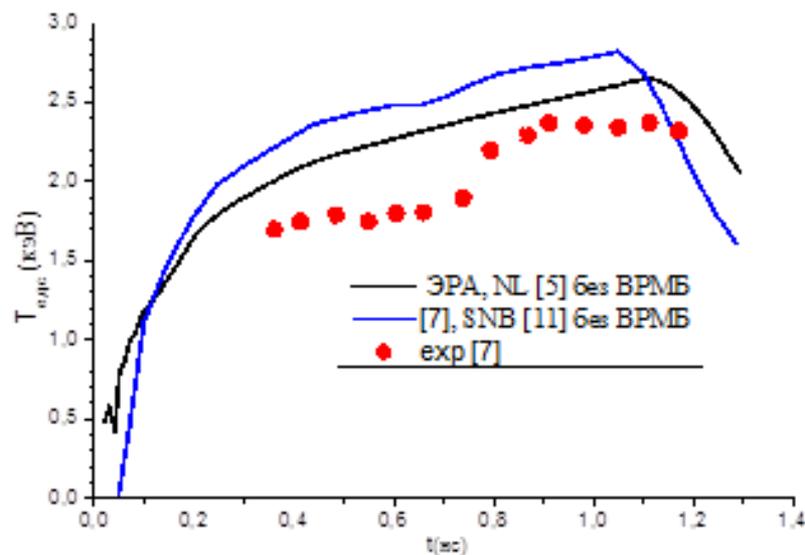
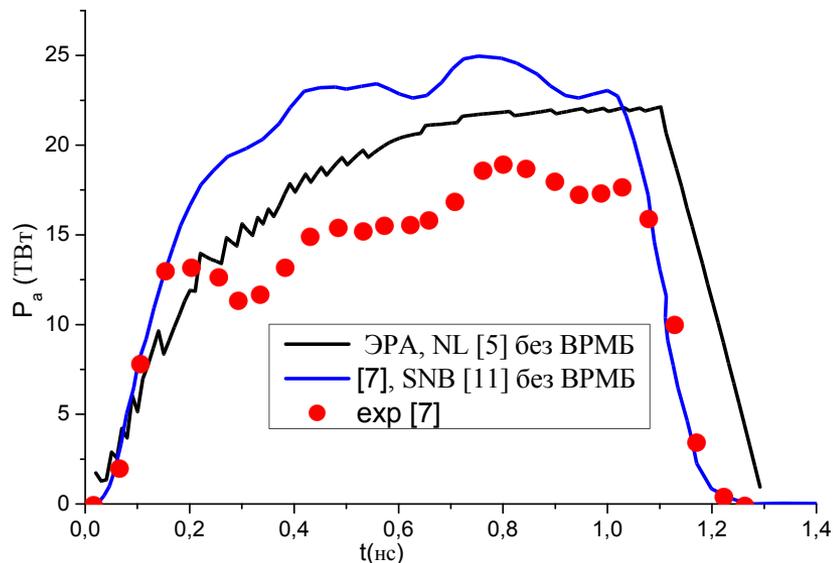
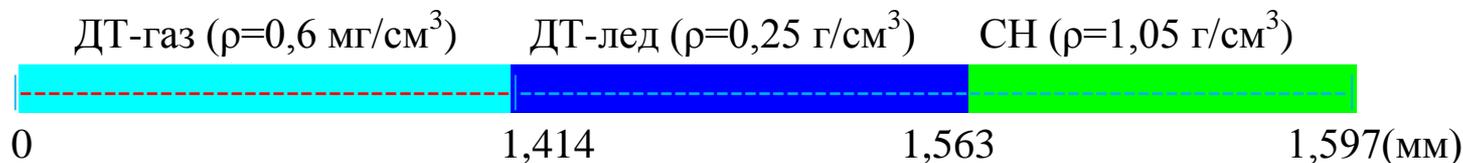


Рисунок 13. Поглощенная лазерная мощность от времени. Эксперимент (красные точки). Расчет с учетом нелокального теплопереноса по программе FC12 без учета ВРМБ – синяя линия; расчет ЭРА с учетом нелокального теплопереноса без учета ВРМБ - черная линия

Рисунок 14 – Зависимость от времени температуры электронов в области $\rho_c/4$. Обозначения – как на рисунке 13

Моделирование мишеней прямого облучения для мегаджоульной установки с излучением во 2-ой гармонике Nd-лазера по программе ЭРА с учетом нелокального теплопереноса.

В работе [8] опубликованы расчеты криогенных мишеней прямого облучения в виде двухслойной оболочки для зажигания на установке с энергией ~ 2 МДж в излучении второй гармоники излучения Nd-лазера. Модель поглощения лазерного излучения, которая использовалась в этих расчетах, учитывала рефракцию, обратно-тормозное и резонансное поглощение лазерного излучения. Аналогичные расчеты были проведены по программе ЭРА с учетом электронной теплопроводности как в приближении ограничения предельным потоком с коэффициентом $f=0,15$, так и по модели нелокального электронного теплопереноса.



8. С.А. Бельков, С.В. Бондаренко, Г.А. Вергунова, С.Г. Гаранин, С.Ю. Гуськов, Н.Н. Демченко, И.Я. Доскач, П.А. Кучугов, Н.В. Змитриенко, В.Б. Розанов, Р.В. Степанов, Р.А. Яхин. Термоядерные мишени прямого облучения лазерным импульсом мегаджоульного уровня. ЖЭТФ, 148, вып. 4. Стр. 784-798 (2015).

Моделирование мишеней прямого облучения для мегаджоульной установки с излучением во 2-ой гармонике Nd-лазера по программе ЭРА с учетом нелокального теплопереноса.

№	E_0 МДж	λ мкм	f	NL	a_{e0}	K_a %	T_{ec} кэВ	ρ_{max} г/см ³	$(\rho R)_{max}$ г/см ²	$T_{i, max}$ кэВ	$E_{Т.Я.}$ МДж
1	2,5	0,53	0,15	-	-	84	6,3	65	1,34	11	42
2	2,5	0,53	-	+	10	79	6,0	29	0,75	11	4,5
3	2,5	0,53	-	+	5	82	6,3	51	1,00	14	23
4	2,5	0,35	0,15	-	-	96	5,2	77	1,37	15	37
5	2,5	0,35	-	+	10	95	5,4	39	0,82	16	15
6	2,5	0,35	-	+	5	96	5,1	55	1,00	17	24

Здесь: E_0 и λ - полная энергия и длина волны ЛИ, падающего на мишень;

f - коэффициент в выражении для предельного электронного потока тепла;

NL – учет/неучет нелокального электронного теплопереноса по модели;

a_{e0} – параметр при пробеге надтепловых электронов в модели нелокального теплопереноса;

K_a – доля энергии ЛИ, поглощенной мишенью;

T_{ec} – температура электронов в области критической плотности на момент $t=8$ нс;

ρ_{max} и $T_{i, max}$ – максимальная плотность и ионная температура «горячего пятна» мишени;

$(\rho R)_{max}$ - поверхностная плотность мишени на момент максимального сжатия;

$E_{Т.Я.}$ - выход термоядерной энергии.

Моделирование мишеней прямого облучения для мегаджоульной установки с излучением во 2-ой гармонике Nd-лазера по программе ЭРА с учетом нелокального теплопереноса.

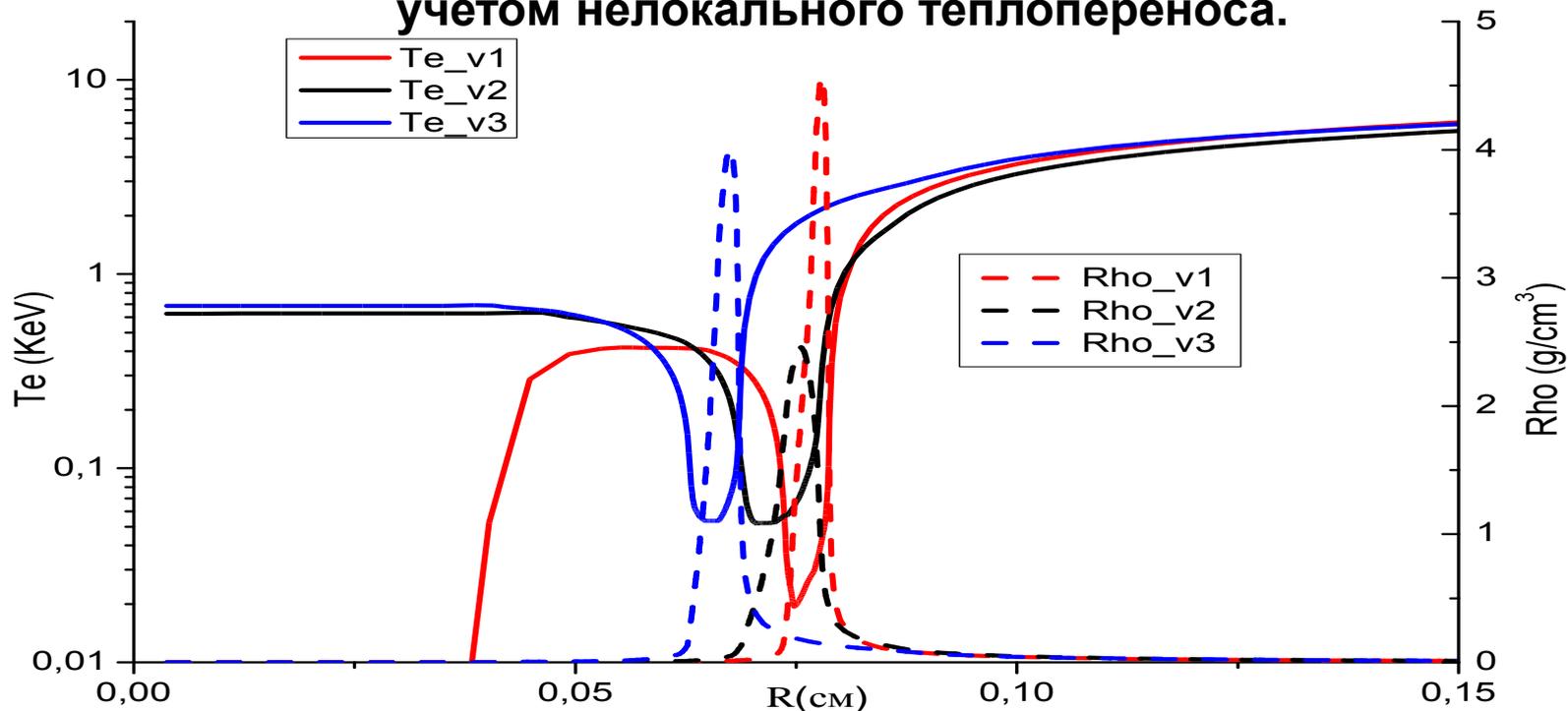


Рисунок 15. Зависимости плотности и температур электронов от Эйлера радиуса на момент времени 8 нс согласно расчетам по программе ЭРА.

v1. Учет ограничения электронной теплопроводности с предельным потоком при $f \approx 0,15$, без учета нелокального теплопереноса;

v2. Учет нелокального теплопереноса с параметром $a_{e0}=10$;

v3. Учет нелокального теплопереноса с параметром $a_{e0}=5$.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В программе ЭРА реализована модель нелокального электронного теплопереноса, ранее предложенная сотрудниками ФИ РАН. Эта модель и ее программная реализация верифицированы как на основе сравнения с расчетами других авторов, так и с результатами экспериментов с газонаполненными оболочками, выполненными на лазерной установке OMEGA

Показано, что одновременный учет процессов нелокального электронного теплопереноса и ВРМБ позволяет отказаться от введения ограничения электронной теплопроводности предельным потоком с эмпирическим коэффициентом f при интерпретации экспериментов, проведенных с оболочечными мишенями на мощных лазерных установках.

Проведены расчеты мишеней прямого облучения для мегаджоульных лазерных установок с излучением во 2-ой и 3-ей гармониках Nd-лазера с учетом нелокального теплопереноса, которые показали актуальность учета этого процесса.

Отмечается необходимость повышения точности моделирования этого эффекта, что требует развитие численных методик и программ для решения спектральных кинетических уравнения Ландау-Фоккера-Планка.



РОСАТОМ



ГОСУДАРСТВЕННАЯ КОРПОРАЦИЯ ПО АТОМНОЙ ЭНЕРГИИ

Благодарю за внимание!