



РОСАТОМ



РФЯЦ-ВНИИТФ
им. академика Е.И.Забабихина

ГОСУДАРСТВЕННАЯ КОРПОРАЦИЯ ПО АТОМНОЙ ЭНЕРГИИ «РОСАТОМ»

**ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ГИДРОДИНАМИЧЕСКИХ
НЕУСТОЙЧИВОСТЕЙ И ПЕРЕМЕШИВАНИЯ ПРИ СЖАТИИ
ГАЗОНАПОЛНЕННЫХ ОБОЛОЧЕК В ОПЫТАХ,
ПРОВЕДЕННЫХ НА УСТАНОВКЕ NIF**

**В.А.Лыков, Е.С.Бакуркина, Н.Г.Карлыханов, Г.Н.Рыкованов,
Л.В.Соколов, В.Е.Черняков, А.Н.Шушлебин**

**Международная конференция
XIII Забабихинские научные чтения**

Снежинск, 21 марта 2017

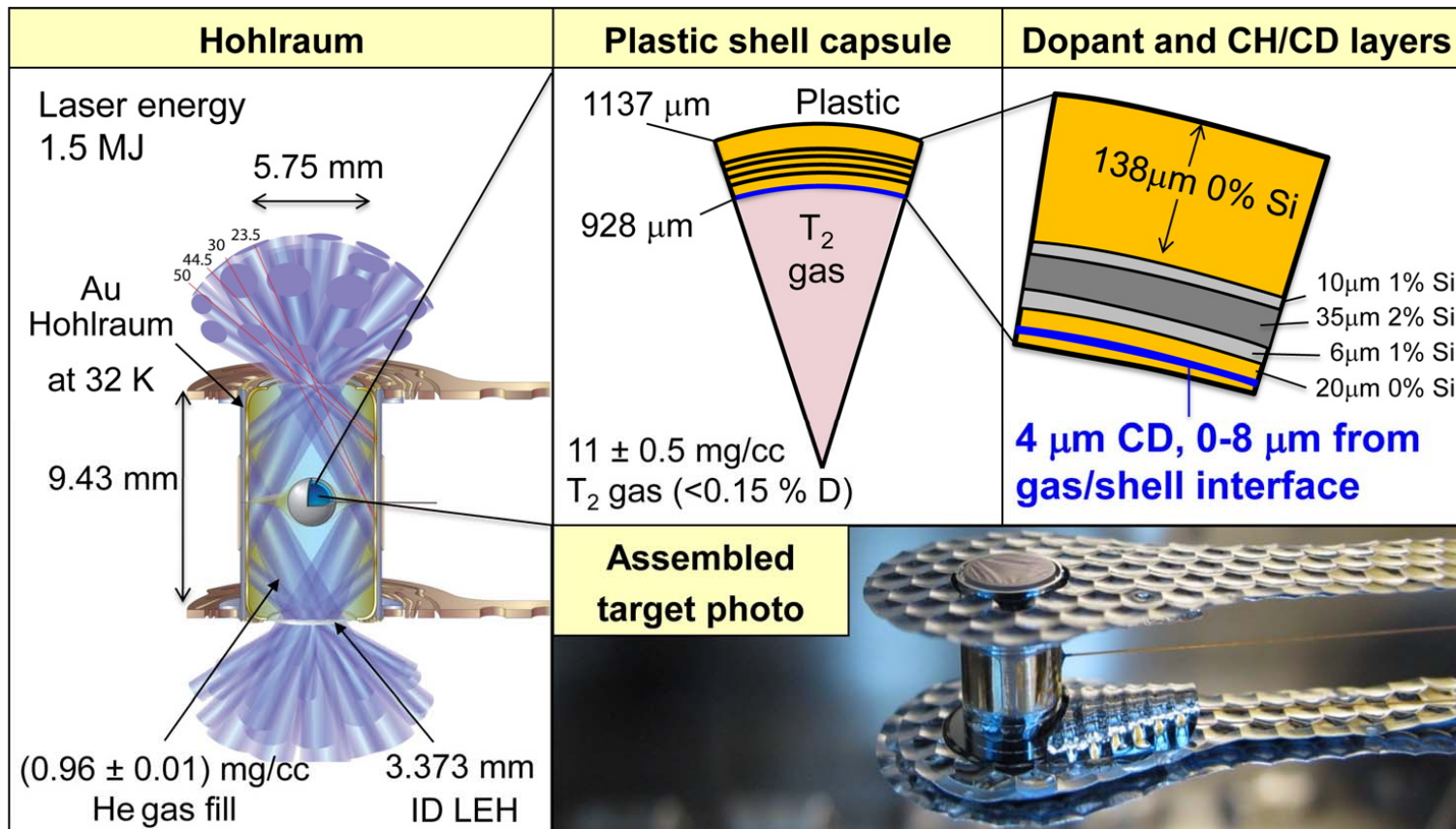
ВВЕДЕНИЕ

- 1. Результаты экспериментов, проведенных на установке NIF с целью изучения атомарного перемешивания в мишенях ИТС.**
- 2. 1D -моделирование перемешивания в экспериментах с оболочками по $k\epsilon$ -модели турбулентного перемешивания.**
- 3. 2D - моделирование по программе ТИГР-ОМЕГА-3Т влияния асимметрии облучения на сжатие газонаполненных оболочек.**
- 4. Моделирование развития коротковолновых возмущений при сжатии газонаполненных оболочек по программе ТИГР-3Т.**

ВЫВОДЫ

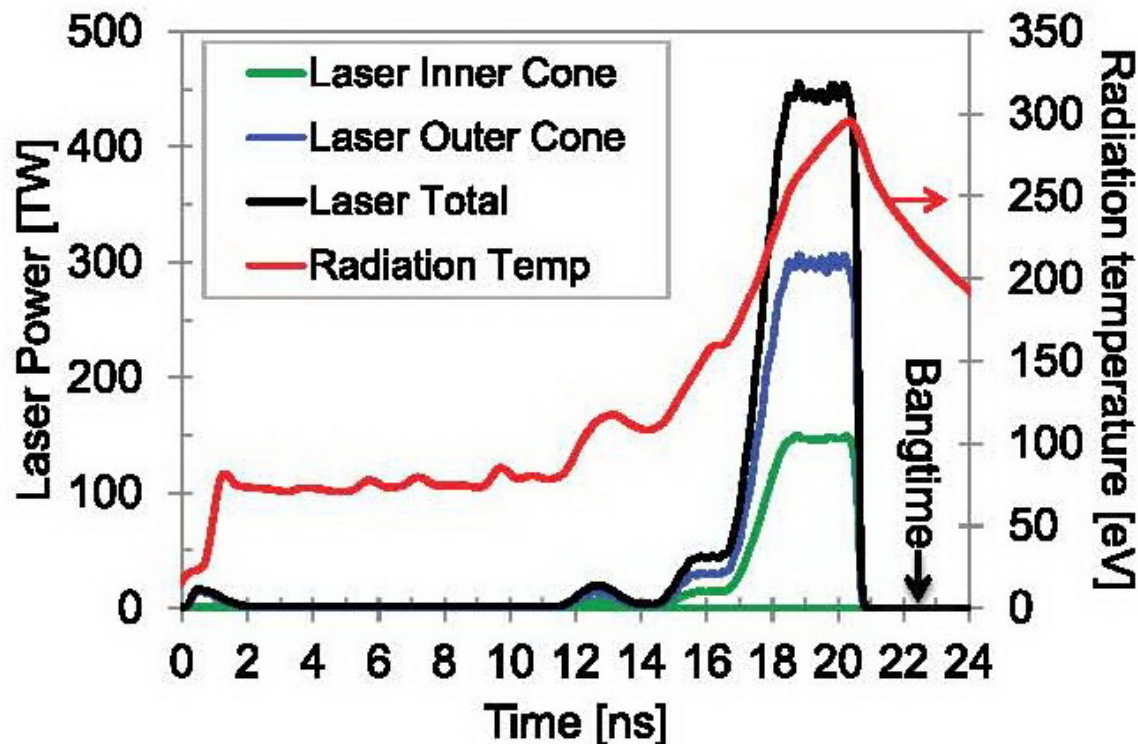
Развитие гидродинамических неустойчивостей и турбулентного перемешивания в мишенях ИТС являются основным препятствием на пути достижения условий термоядерного зажигания на мощных лазерных установках. Поэтому их экспериментальному и расчетно-теоретическому изучению уделяется большое внимание.

Эксперименты, проведенные на установке NIF с целью изучения атомарного перемешивания в мишенях ИТС.



Цилиндрический хольраум из золота (слева). В центре хольраума размещена мишень, конструкция которой показана справа. Справа внизу – фотография сборки, которая использовалась в опыте N12119 на установке NIF*)

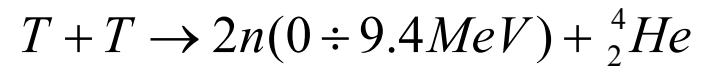
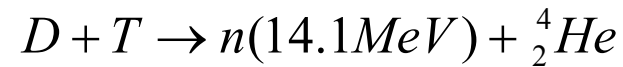
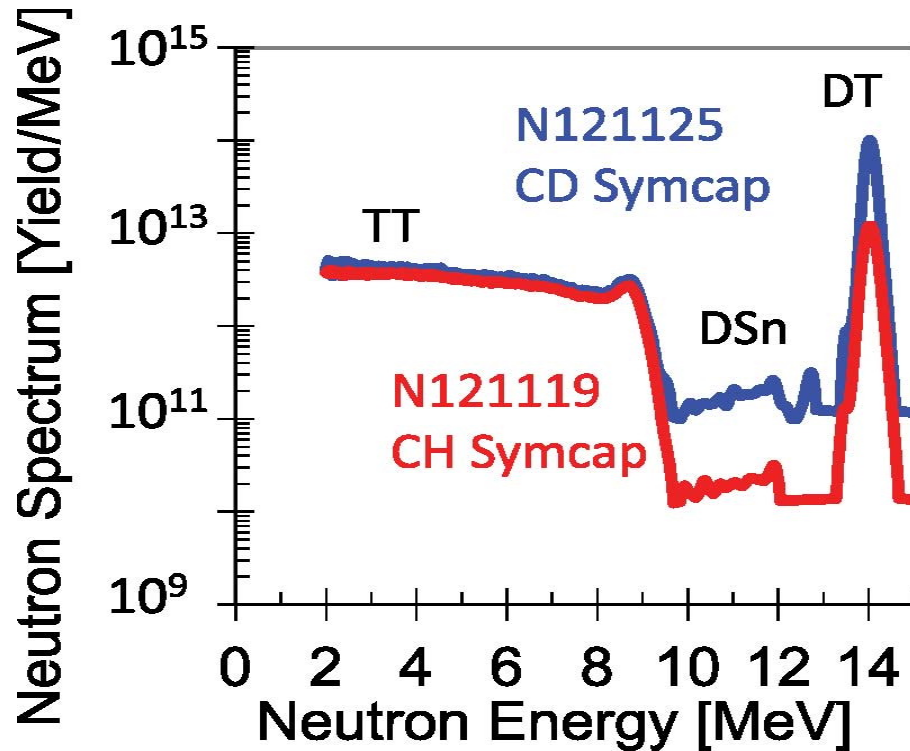
Мощность лазерного излучения NIF и температура излучения в хольрауме



Полная мощность лазерной энергии от времени в опыте N130512 при пиковом значении 436 ТВт - черная линия. Мощность лазерного излучения во внутреннем и внешнем конусе лазерных пучков - зеленая и синяя линии.

Зависимость температуры излучения хольраума от времени – красная линия

Спектры нейтронов в опытах на лазере NIF с оболочками, заполненными T₂-газом



$$Y_{DT} \approx n_D n_T \langle \sigma v \rangle_{DT} V_{mix} t_{mix} + Y_{DT-фон}$$

$\langle \sigma v \rangle_{DT}$ – скорость ДТ-реакции

n_D, n_T – концентрации D и T

V_{mix} – объем смеси

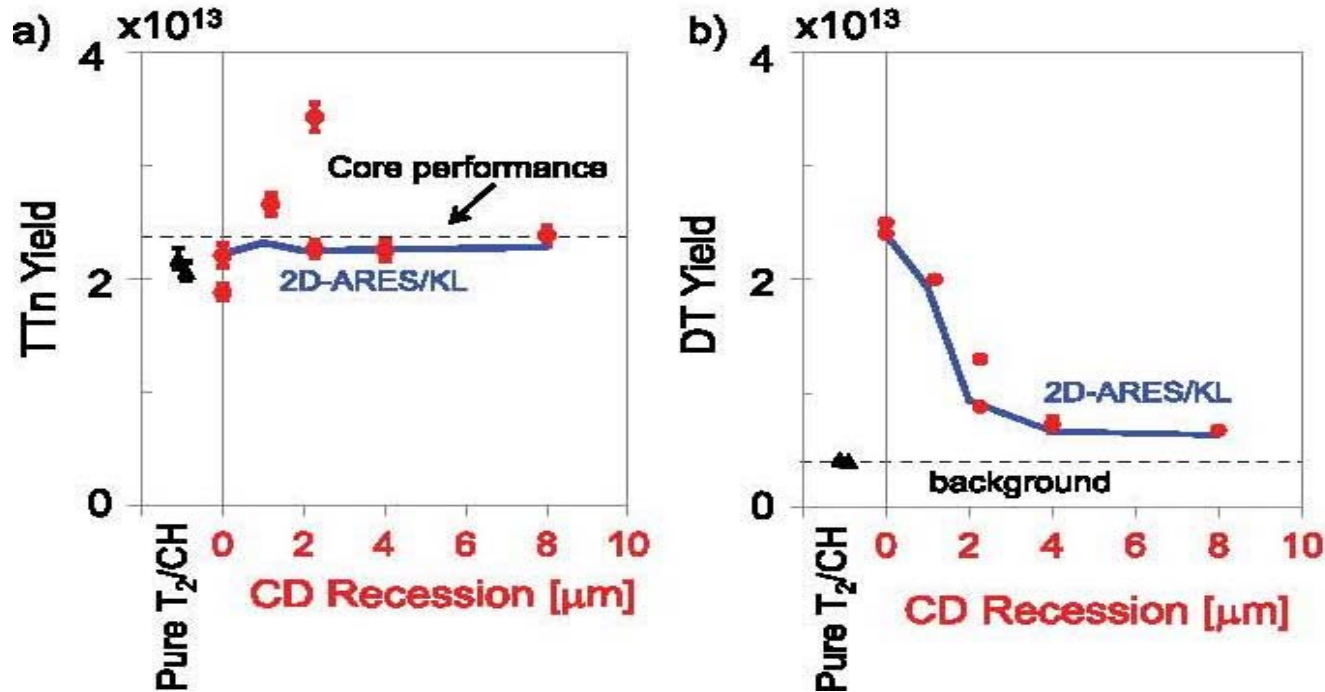
t_{mix} – время протекания реакции

$Y_{DT-фон}$ – фон ДТ-нейтронов от примеси D в T₂-газе (<0.15%)

Нейтронные спектры^{*)}, зарегистрированные в контрольном опыте без CD-слоя (№121119) и в опыте с CD-слоем на границе с T-газом (№121125).

^{*)} D.T. Casey, et al, Physics of Plasmas **21**, 092705 (2014)

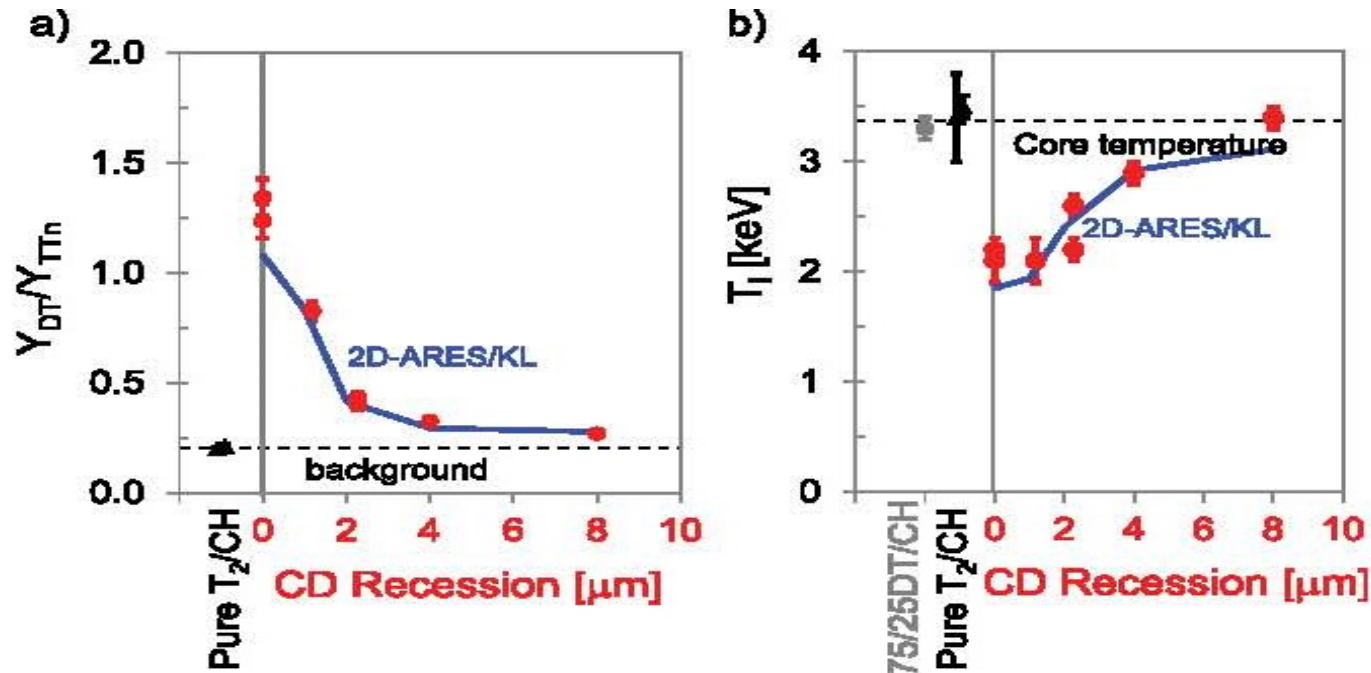
Выходы ТТ- и ДТ-нейтронов в опытах на NIF с оболочками, заполненными T_2 -газом.



- a) **Выход ТТ-нейтронов** для СН-оболочек, заполненных тритием (черные метки) и в опытах с CD-слоем, который был размещен на разной глубине СН-оболочки (красные метки). Синяя линия - 2D-расчеты по программе ARES.
- b) **Выход ДТ-нейтронов** для контрольных экспериментов (без CD-слоя) и опытов с CD-слоем. Синяя линия - 2D-расчеты по программе ARES.

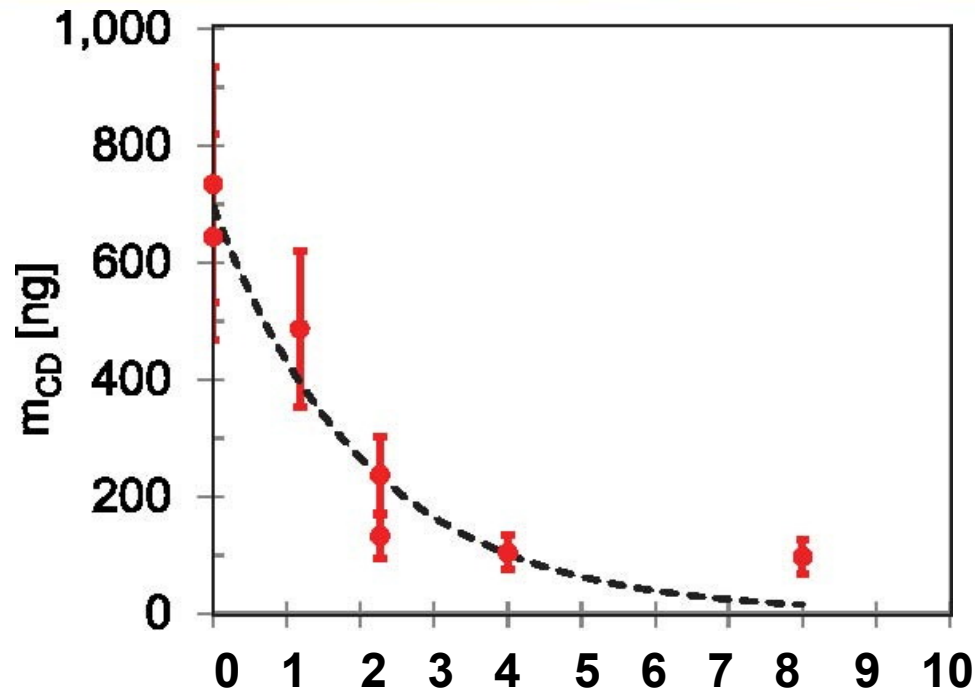
*) D.T. Casey, et al, Physics of Plasmas **21**, 092705 (2014)

Выходов ДТ-нейтронов и температура ионов в опытах на лазере NIF с оболочками, заполненными T_2 -газом.



- Отношение выходов ДТ- и ТТ- нейтронов** при разной глубине размещения слоя CD толщиной 4 мкм в оболочке из СН.
- Температура ионов**, определенная по Допплеровскому уширению ДТ-нейтронов. **Синяя линия - 2D-расчеты по программе ARES**

Определение массы CD, атомарно смешанной с тритием и вступившей в ДТ-реакцию при температуре 2 кэВ



Масса атомарно перемешанного с тритием слоя CD, вступившего в ДТ-реакцию, в зависимости от места его размещения в СН-оболочке.

Черная пунктирная кривая отвечает полной массе CD, вступившей в ДТ-реакции, $m_{CD} \sim 820$ нг с масштабом перемешивания $L_{mix} \sim 2,1$ мкм

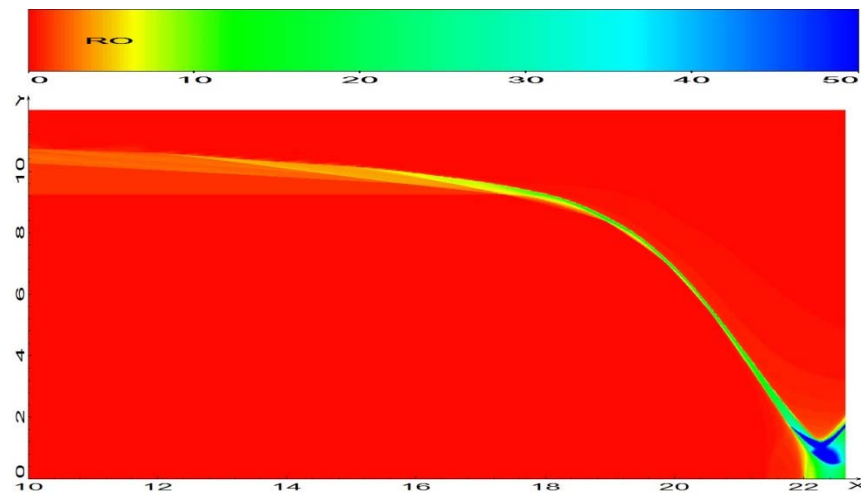
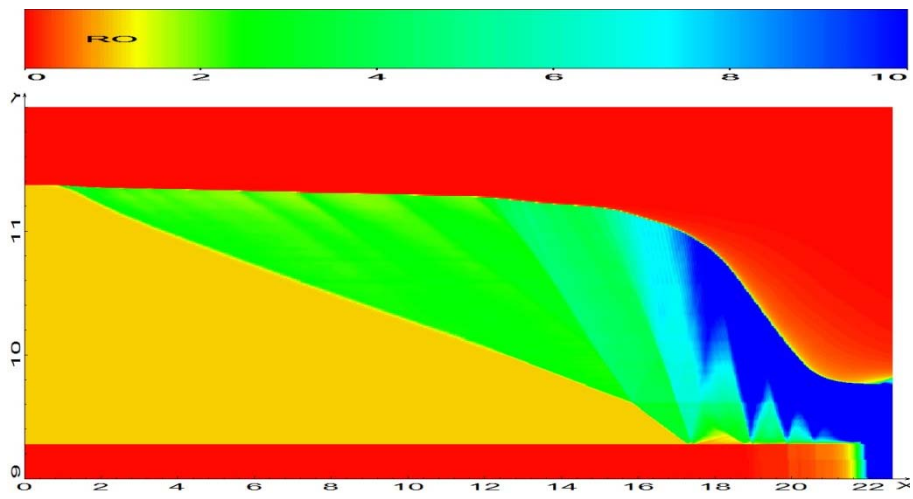
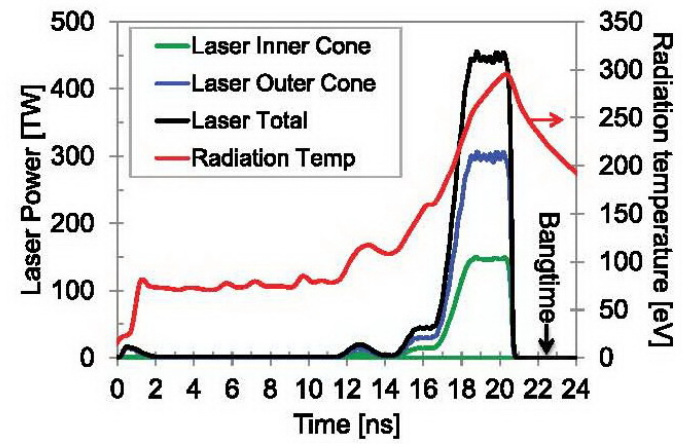
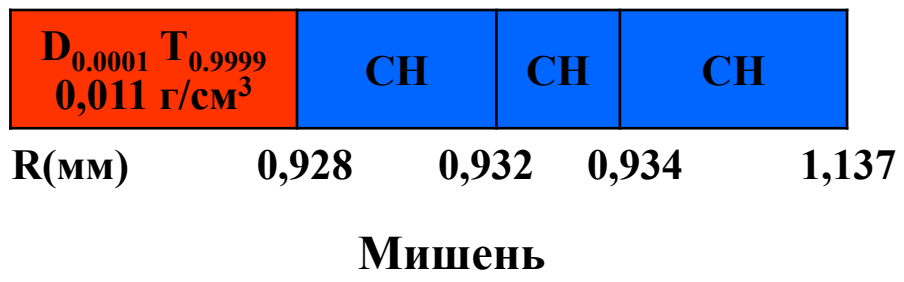
Компьютерные программы РФЯЦ-ВНИИТФ для моделирования ИТС - мишеней



Название	ЭРА	ТИГР-ОМЕГА
Число измерений	1D	2D
2-температурная модель для электронов и ионов	+	+
Перенос излучения	Спектральный кинетический	Эффективная температура
Теплопроводность	e, i	e, i
Турбулентное перемешивания	+	+
Термоядерные реакции и перенос их продуктов	+	+
Модель поглощения лазерного излучения	+	+/-
Генерация и перенос быстрых электронов	+	-

Уравнения состояния и пробеги излучения - из библиотеки РФЯЦ-ВНИИТФ

1D -моделирование турбулентного перемешивания в экспериментах с оболочками по $k\varepsilon$ -модели*)



Распределение плотности в зависимости от времени в лагранжевых (слева) и эйлеровых координатах (справа) в 1D-расчете газонаполненной оболочки

*) Неуважаев В.Е., Яковлев В.Г. Расчет гравитационного турбулентного перемешивания по $k\varepsilon$ -модели// ВАНТ. Сер. Мат. моделирование физических процессов. 1989. Вып. 1. С. 28-36.

1D -моделирование турбулентного перемешивания в контрольных экспериментах по $k\epsilon$ -модели^{*)}



R	$D_{0.0001} T_{0.9999}$ 0,011 г/см ³	CH	CH	CH
	0,928	0,932	0,934	1,137 мм

nn	# опыта/ L_0 в расчете	N_{dt} 10^{13}	N_{tt} 10^{13}	$T_{i,dt}$ кэВ	ρ_{max} г/см ³	M_{clean} %	$L_{1/e}$ μm
1	# 120904	0,41	2,2	3,4	50	-	2,1
2	# 121119	0,40	2,1	3,5	41	-	2,1
3	без mix	0,25	11	3,3	35	100	-
4	автомод.	0,22	10	3,2	44	41	1,9
5	$L_0=2 \mu m$	0,19	8,5	3,0	52	31	2,3

Здесь: N_{dt} и N_{tt} – выходы ДТ- и ТТ- нейтронов;

$T_{i,dt}$ – экспериментальная и расчетная температура ионов при сжатии газа;

ρ_{max} - экспериментальное и расчетная плотности сжатого газа;

M_{clean} (%) – масса газа, свободная от СН (по уровню концентрации 95%);

$L_{1/e}$ (μm) – перемешанная толщина оболочки по уровню концентрации $1/e$.

В расчете начальная концентрация D занижена в ~ 6 раз.

Расчетный выход нейтронов слабо зависит от перемешивания и ~ 5 раз выше экспериментального

^{*)} Неуважаев В.Е., Яковлев В.Г. Расчет гравитационного турбулентного перемешивания по $k\epsilon$ -модели// ВАНТ. Сер. Мат. моделирование физических процессов. 1989. Вып. 1. С. 28-36.

1D -моделирование турбулентного перемешивания в экспериментах с оболочками по $k\varepsilon$ -модели*)



$D_{0.0001} T_{0.9999}$ 0,011 г/см ³	CD 4 мкм	CH	CH
R	0,928	0,932	0,934
			1,137 мм

nn	# опыта/ L_0 в расчете	N_{dt} 10 ¹³	N_{tt} 10 ¹³	$T_{i,dt}$ кэВ	ρ_{max} г/см ³	M_{clean} %	$L_{1/e}$ μm
6	# 121125	2,5	2,2	2,1	41	-	2,1
7	# 130510	2,4	1,9	2,2	53	-	2,1
8	автомод.	2,5	10	-	44	40	2,0
9	$L_0=2 \mu m$	2,8	8,6	-	52	31	2,4

Здесь: N_{dt} и N_{tt} – выходы ДТ- и ТТ- нейтронов;

$T_{i,dt}$ – экспериментальная температура ионов при сжатии газа;

ρ_{max} - экспериментальное и расчетная плотности сжатого газа;

M_{clean} (%) – масса газа, свободная от СН (по уровню концентрации 95%);

$L_{1/e}$ (μm) – перемешанная толщина оболочки по уровню концентрации 1/e .

Расчетный выход ДТ-нейтронов совпадает с экспериментальным и в ~ 6 раз выше фоновых значений.

*) Неуважаев В.Е., Яковлев В.Г. Расчет гравитационного турбулентного перемешивания по $k\varepsilon$ -модели// ВАНТ. Сер. Мат. моделирование физических процессов. 1989. Вып. 1. С. 28-36.

1D -моделирование турбулентного перемешивания в экспериментах с оболочками по $k\varepsilon$ -модели*)



$D_{0.0001} T_{0.9999}$ 0,011 г/см ³	СН 2 мкм	СД 4 мкм	СН
R	0,928	0,930	0,934
			1,137 мм

nn	# опыта/ L_0 в расчете	N_{dt} 10^{13}	N_{tt} 10^{13}	$T_{i,dt}$ кэВ	ρ_{max} г/см ³	M_{clean} %	$L_{1/e}$ μm
13	# 130315	0,88	2,3	2,2	59	-	2,1
14	# 130512	1,3	3,4	2,6	43	-	2,1
15	автомод.	0,23	10	-	44	40	1,9
16	$L_0=2 \mu m$	1,3	8,5	-	52	34	2,4

Здесь: N_{dt} и N_{tt} – выходы ДТ- и ТТ- нейтронов; $T_{i,dt}$ – экспериментальная и расчетная температура ионов при сжатии газа;

ρ_{max} - экспериментальное и расчетная плотности сжатого газа;

M_{clean} (%) – масса газа, свободная от СН (по уровню концентрации 95%);

$L_{1/e}$ (μm) – перемешанная толщина оболочки по уровню концентрации $1/e$.

Расчетный выход ДТ-нейтронов совпадает с экспериментальным при начальной шероховатости $L_0=2$ мкм.

*) Неуважаев В.Е., Яковлев В.Г. Расчет гравитационного турбулентного перемешивания по $k\varepsilon$ -модели// ВАНТ. Сер. Мат. моделирование физических процессов. 1989. Вып. 1. С. 28-36.

1D -моделирование турбулентного перемешивания в экспериментах с оболочками по $k\varepsilon$ -модели*)



$D_{0.0001} T_{0.9999}$ 0,011 г/см ³	СН 1 мкм	СД 5 мкм	СН
R	0,928	0,929	0,934
	1,137 мм		

nn	# опыта/ L_0 в расчете	N_{dt} 10 ¹³	N_{tt} 10 ¹³	$T_{i,dt}$ кэВ	ρ_{max} г/см ³	M_{clean} %	$L_{1/e}$ μm
10	# 130317	2,0	2,7	2,1	43	-	2,1
11	автомод.	0,30	10	-	44	41	1,6
12	$L_0=2 \mu m$	2,0	9,0	-	51	32	2,2

Здесь: N_{dt} и N_{tt} – выходы ДТ- и ТТ- нейтронов;

$T_{i,dt}$ – экспериментальная температура ионов при сжатии газа;

ρ_{max} - экспериментальное и расчетная плотности сжатого газа;

M_{clean} (%) – масса газа, свободная от СН (по уровню концентрации 95%);

$L_{1/e}$ (μm) – перемешанная толщина оболочки по уровню концентрации 1/e .

Расчетный выход ДТ-нейтронов совпадает с экспериментальным при начальной шероховатости $L_0=2$ мкм.

*) Неуважаев В.Е., Яковлев В.Г. Расчет гравитационного турбулентного перемешивания по $k\varepsilon$ -модели// ВАНТ. Сер. Мат. моделирование физических процессов. 1989. Вып. 1. С. 28-36.

1D -моделирование турбулентного перемешивания в экспериментах с оболочками по $k\varepsilon$ -модели*)

$D_{0.0001} T_{0.9999}$ 0,011 г/см ³	СН 4 мкм	CD 4 мкм	СН
R	0,928	0,932	0,936
			1,137 мм

nn	# опыта/ L_0 в расчете	N_{dt} 10^{13}	N_{tt} 10^{13}	$T_{i,dt}$ кэВ	ρ_{max} г/см ³	M_{clean} %	$L_{1/e}$ μm
17	# 130612	0,72	2,3	2,9	35	-	2,1
18	# 130614	0,67	2,4	3,4	33	-	2,1
19	автомод.	0,22	10	-	45	40	2,1
20	$L_0=2 \mu m$	0,62	8,5	-	53	27	2,5

Здесь: N_{dt} и N_{tt} – выходы ДТ- и ТТ- нейтронов; $T_{i,dt}$ – экспериментальная и расчетная температура ионов при сжатии газа;

ρ_{max} - экспериментальное и расчетная плотности сжатого газа;

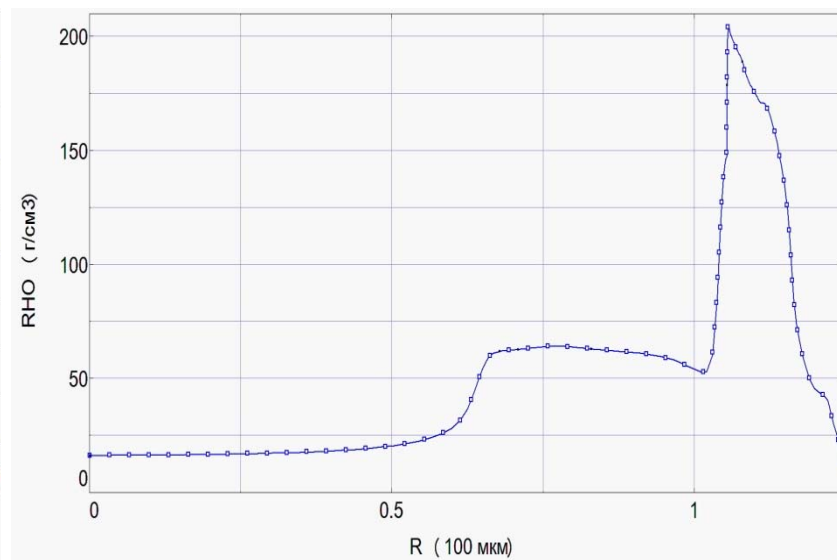
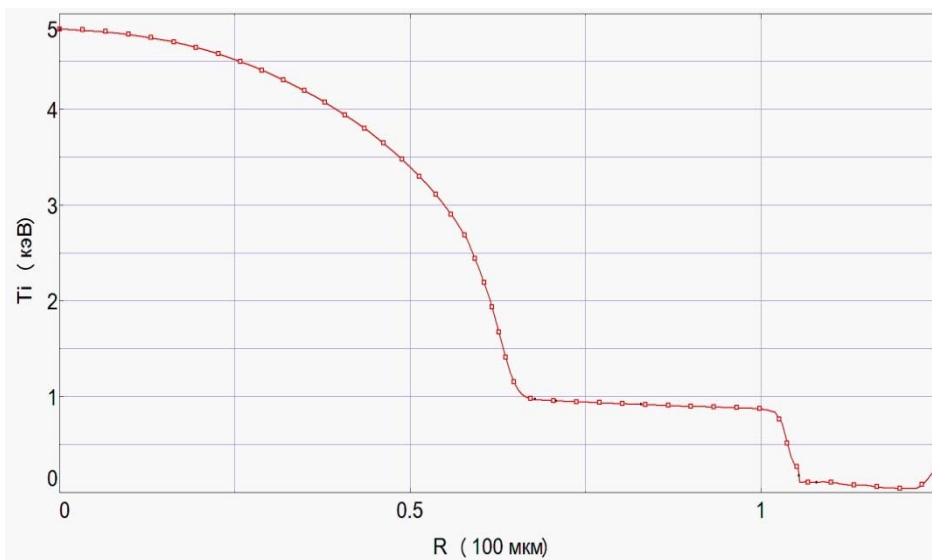
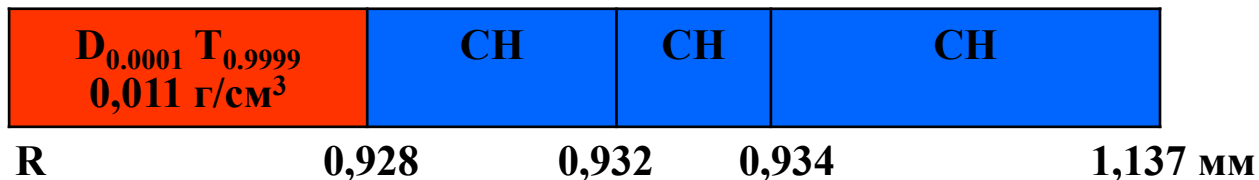
M_{clean} (%) – масса газа, свободная от СН (по уровню концентрации 95%);

$L_{1/e}$ (μm) – перемешанная толщина оболочки по уровню концентрации $1/e$.

Расчетный выход ДТ-нейтронов совпадает с экспериментальным при начальной шероховатости $L_0=2$ мкм.

*) Неуважаев В.Е., Яковлев В.Г. Расчет гравитационного турбулентного перемешивания по $k\varepsilon$ -модели// ВАНТ. Сер. Мат. моделирование физических процессов. 1989. Вып. 1. С. 28-36.

1D -моделирование турбулентного перемешивания в экспериментах с оболочками по к ϵ -модели*)

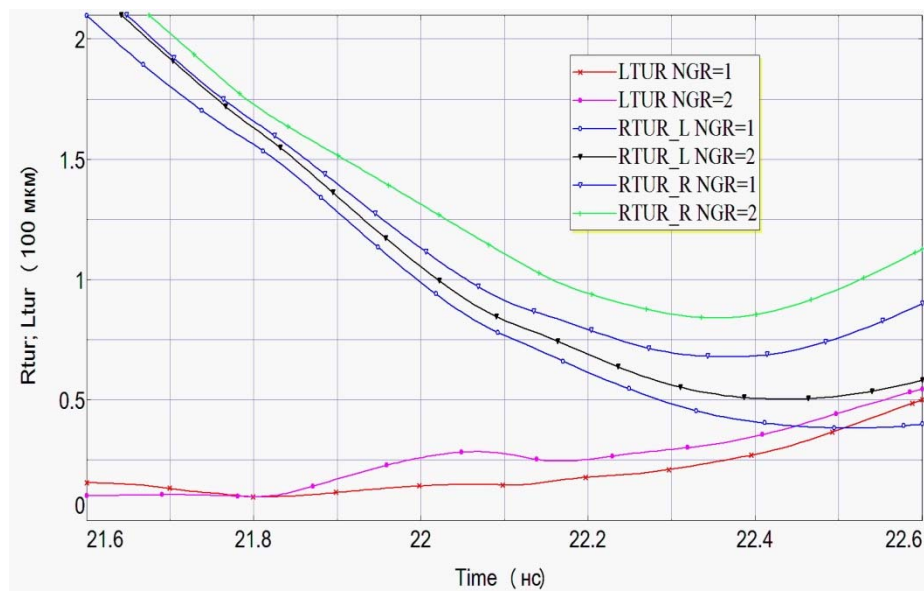
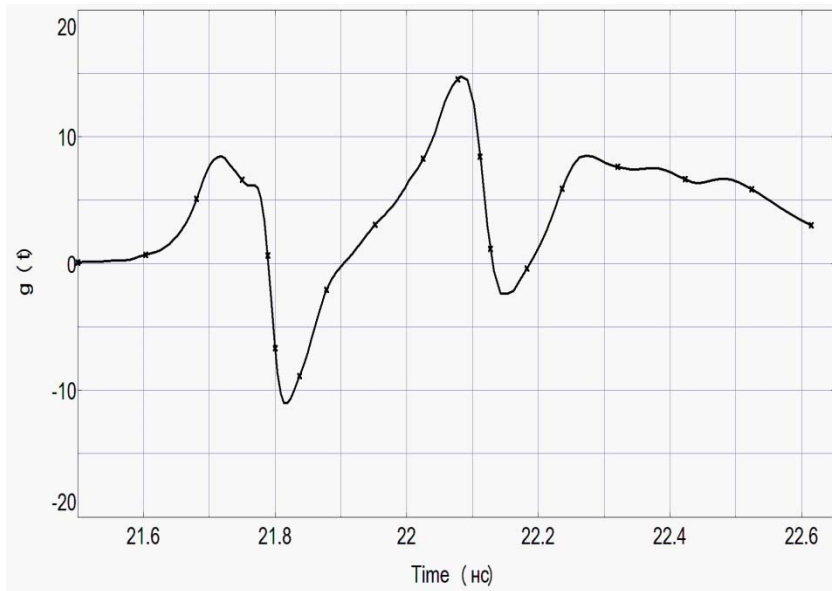
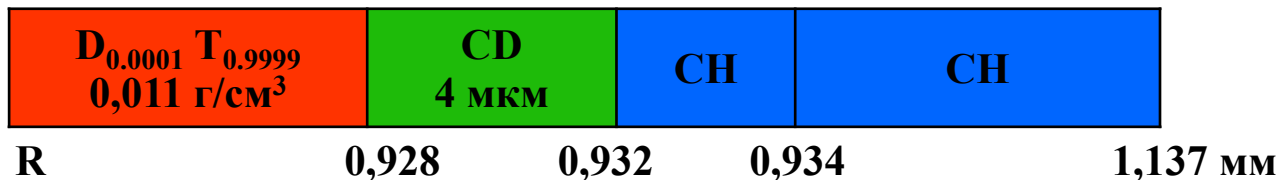


Слева- **Профиль ионной температуры** на момент $t \approx 22,2$ нс - максимума т.я. реакций
 Справа- **Профиль плотности** на момент $t \approx 22,2$ нс - максимума DT- и ТТ-реакций

Генерация более 70% нейтронов ТТ-реакции в 1D-расчете происходит в центральной области при $T_i > 4$ кэВ, имеющей массу $\sim 20\%$ от массы газа.

*) Неуважаев В.Е., Яковлев В.Г. Расчет гравитационного турбулентного перемешивания по к ϵ -модели// ВАНТ. Сер. Мат. моделирование физических процессов. 1989. Вып. 1. С. 28-36.

1D -моделирование турбулентного перемешивания в экспериментах с оболочками по к ϵ -модели*)

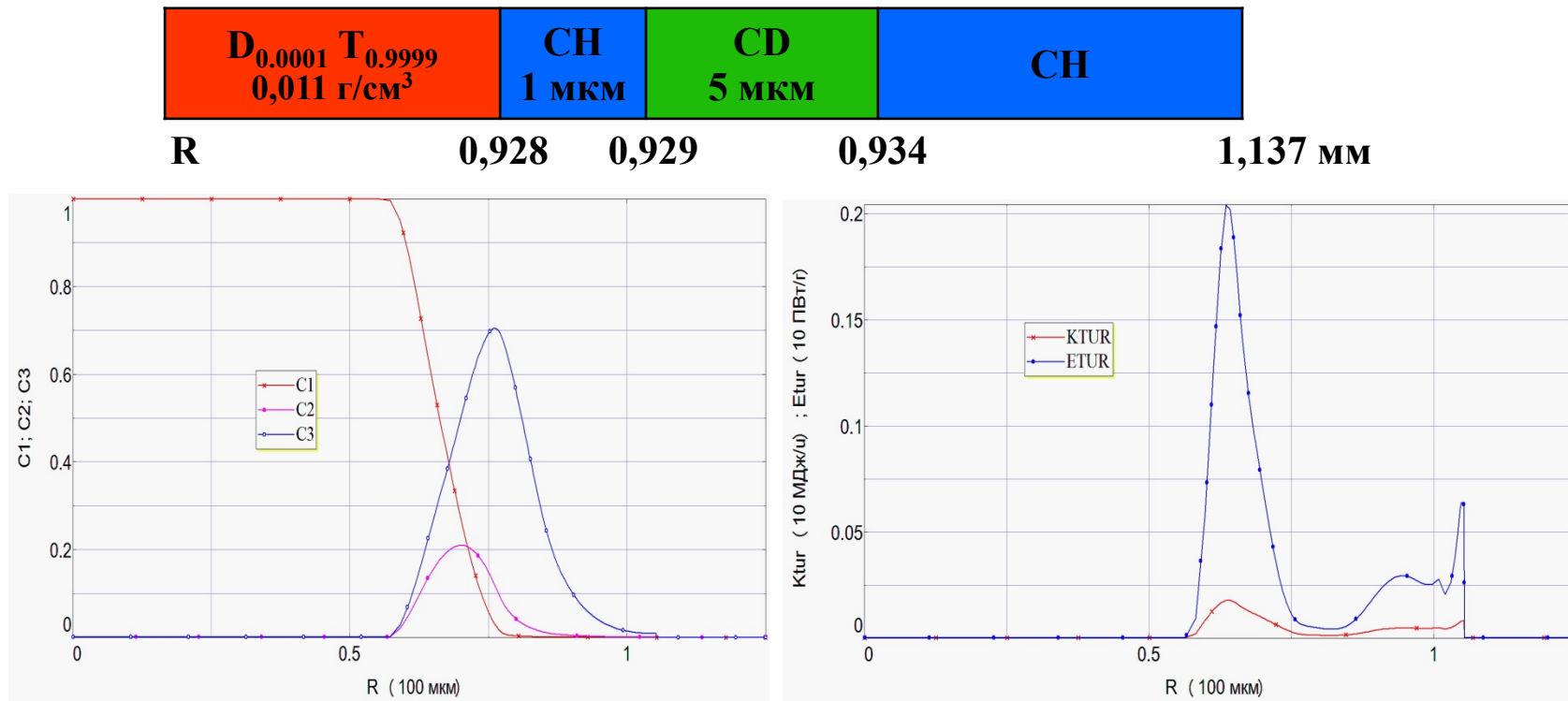


Зависимость от времени ускорения на границе газа с оболочкой (слева)

Зависимость от времени зон и ширин перемешивания на границах слоя CD в расчете с $L_0=2\text{мкм}$ (справа)

*) Неуважаев В.Е., Яковлев В.Г. Расчет гравитационного турбулентного перемешивания по к ϵ -модели// ВАНТ. Сер. Мат. моделирование физических процессов. 1989. Вып. 1. С. 28-36.

1D -моделирование турбулентного перемешивания в экспериментах с оболочками по $k\epsilon$ -модели*)



Слева: **Профили концентрации трития (C1), запирающего слоя CH(C2) и слоя CD (C3)** на момент $t \approx 22,2$ нс - максимума DT-реакции.

Справа: **Профили турбулентной кинетической энергии k и скорости затухания кинетической энергии ϵ** на момент $t \approx 22,2$ нс - максимума DT- и TT-реакций.

*) Неуважаев В.Е., Яковлев В.Г. Расчет гравитационного турбулентного перемешивания по $k\epsilon$ -модели// ВАНТ. Сер. Мат. моделирование физических процессов. 1989. Вып. 1. С. 28-36.

О необходимости учета диффузии ионов при сжатии газонаполненных оболочек в опытах на лазере NIF.

Согласно работе [*] размеры частиц, для которых существенны процессы диффузии ионов в плазме можно оценить по формуле:

$$r_*(\mu\text{m}) \leq \sqrt{D\Delta t_*} \approx \sqrt{\frac{A_2 T_i^{5/2} \Delta t_*}{Z_1^2 Z_2^2 \rho_2^* \sqrt{A_1}}}$$

где: Δt_* - время (нс); T_i - температура ионов (кэВ); Z_1, A_1 - заряд, масса ядра легкой компоненты; Z_2, A_2 и ρ_2^* - заряд, масса ядра и плотность тяжелой компоненты; $\Delta t_* \approx R_*/C_{зв}$, R_* - характерный размер сжатого газа, $C_{зв}$ - скорость звука.

Для $T_i \approx 1-2$ кэВ, $\rho_2^* \approx 50$ г/см³ и $R^* \sim 60$ мкм: $r_* \approx 0,3$ мкм - характерный размер частиц пластика, которые успеют обменяться тяжелыми изотопами водорода с окружающим газом за время .

Масса слоя CD толщиной $\Delta r \approx 0,3$ мкм, окружающего газ с $R^* \sim 60$ мкм, составляет ~ 500 нг, что к близко к данным опыта - массе CD ~ 820 нг, которая атомарно смешалась с тритием и вступила в ДТ-реакцию при $T_i \sim 2$ кэВ .

Вывод: необходим учет диффузии ионов в плазме при моделировании опытов, проведенных на NIF по атомарному перемешиванию в мишенях ИТС.

*) Г.Н .Рыкованов. Диффузионное расплывание частиц в зоне турбулентного смешивания. ВАНТ, серия: теоретическая и прикладная физика, вып.1, 50-52 (1987).

О турбулентных числах Рейнольдса при сжатии газонаполненных оболочек в опытах на установке NIF.



Для турбулентного числа Рейнольдса можно написать оценку:
 $Re^* \approx L^*(dL^*/dt)/\nu_i$, где: $L^*(t)$ - зависимость ширины зоны перемешивания от времени, ν_i - ионная кинематическая вязкость.

Оценка коэффициент кинематической вязкости для DT дает:

$$\nu_i(\text{см}^2/\text{с}) \approx 10 T_i^{5/2} / \rho.$$

Для рассматриваемых задач вблизи момента максимального сжатия мишени: $L^* \sim 2 \cdot 10^{-3}$ см, $dL^*/dt \approx 5 \cdot 10^6$ см/с, что при $T_i \sim 1$ кэВ и $\rho \sim 20$ г/см³ дают оценку турбулентных чисел Рейнольдса $Re^* \sim 2 \cdot 10^4$.

Числа Рейнольдса $Re^* \sim 2 \cdot 10^4$ позволяют говорить о возможности достижения турбулентной стадии развития неустойчивости Релея-Тейлора при сжатии газонаполненных оболочек на установке NIF*).

Комплекс двумерных программ ТИГР-ОМЕГА-3Т¹⁾ :

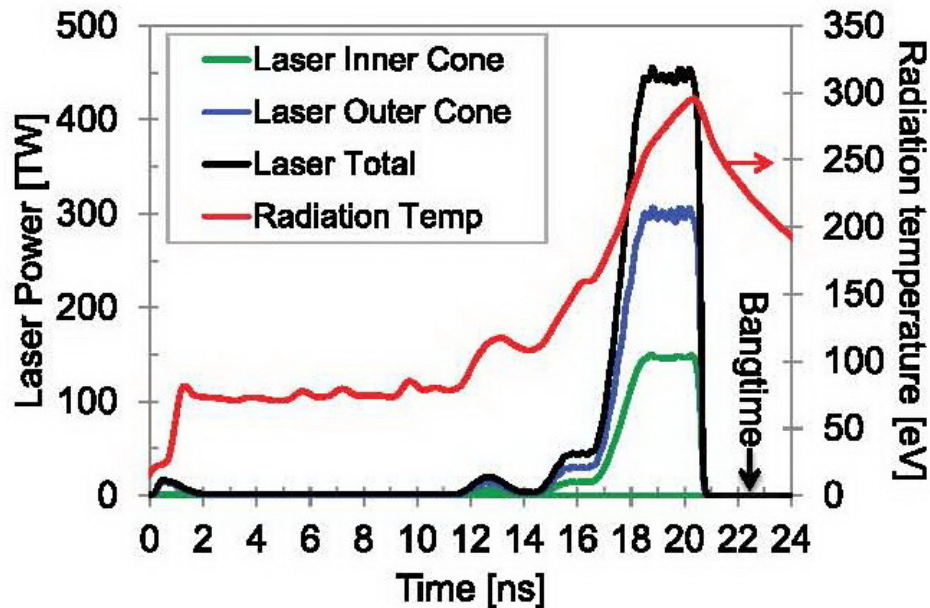
- **двумерная трехтемпературная газовая динамика;**
- **уравнения кинетики термоядерных реакций;**
- **генерация и перенос альфа - частиц и нейтронов;**
- **метод концентраций для течений с большими деформациями²⁾**

1. Е.Н. Аврорин и др, Обзор теоретических работ по ИТС, проведенных в РФЯЦ-ВНИИТФ. В сб. Вопросы современной технической физики. Избранные труды РФЯЦ - ВНИИТФ. стр. 252-276. (РФЯЦ-ВНИИТФ, Снежинск, 2002).
2. А.Н. Шушлебин и др. Расчеты с учетом больших деформаций термоядерных мишеней непрямого облучения для лазерной установки ИСКРА-6, Доклад на «IX Забабахинские научные чтения», Снежинск, Россия, 2007

Расчеты влияния асимметрии облучения на сжатие оболочек, заполненных $D_{0,75}T_{0,25}$ -газом

Мишень с $D_{0,75}T_{0,25}$ -газом *) в расчетах по программе ТИГР-ОМЕГА-3Т

№ обл	1	2	3	4	5	6	7	8
R(мм)	0.928	0.930	0.934	0.948	0.954	0.989	1.000	1.137
ρ	0,0084	1,05	1,05	1,05	1,10	1,15	1,10	1,05
состав	$D_{0,75}T_{0,25}$	CH	CH	CH	CHSi-1%	CHSi-2%	CHSi-1%	$C_{0,5}H_{0,5}$



$$q_e^* = 0,6n_eT_e\sqrt{T_e/m_e}$$

$$q_i^* = 0,5n_iT_i\sqrt{T_i/\langle A \rangle m_p}$$

$$q_f^* = c\sigma T_f^4/4$$

$$T_f(t, \theta) = T_{f, \text{гран.}}(t)(1 + 0,25 \cdot \gamma_4 P_4(x)) \quad \gamma_4 = -1,5\% \text{-асимметрия в потоке излучения}$$

*) S.V. Weber, et al, Simulations of indirectly driven gas-filled capsules at the National Ignition Facility, Physics of Plasmas 21, 112706 (2014)

2D- расчеты по ТИГР-ОМЕГА-3Т сжатия мишени при асимметрии в потоке излучения $\gamma_4 = -1,5\%$

Результаты опыта N 120923 с мишенью, заполненной $D_{0,75}T_{0,25}$ -газом *) и результаты расчетов по программе ТИГР-3Т .

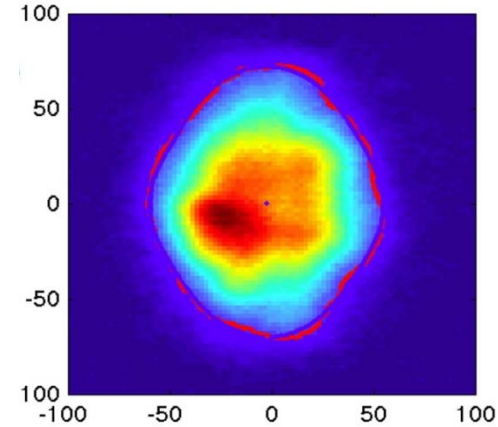
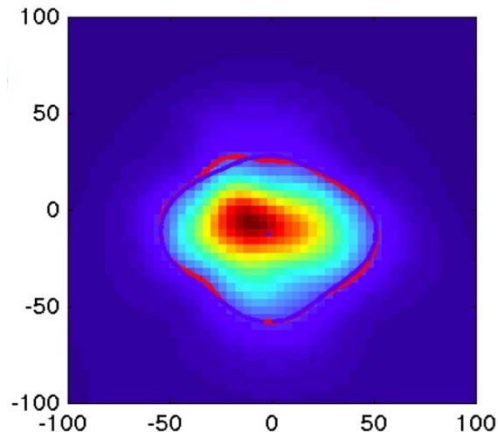
№	опыт/ расчет	N_{dt} 10^{15}	N_{dd} 10^{13}	$T_{i,dt}$ кэВ	t_γ (нс)	примечания
1	Опыт*) N120923	0,67	0,75	3,1	22,4	-
2	1D-ТИГР-3Т	5,0	5,5	3,0	22,4	$a_4=0$.
3	2D-ТИГР -3Т	4,4	4,8	3,0	22,4	$a_4=1,5\%$

Здесь: N_{dt} и N_{dd} – выходы нейтронов ДТ- и ДД- реакций;
 $T_{i,dt}$ – экспериментальные и расчетные температуры ионов,
 t_γ – время срабатывания мишени по вспышке гамма-квантов

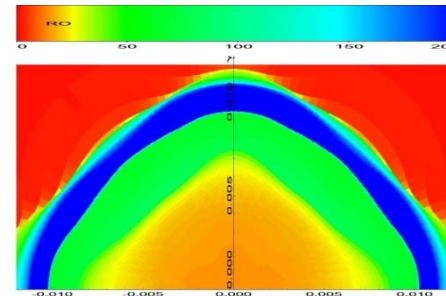
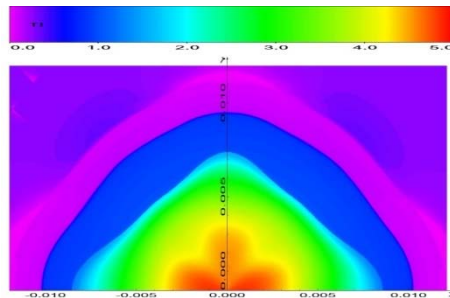
Нейтронный выход в расчете ТИГР-ОМЕГА-3Т, выполненном при асимметрии в потоке излучения $a_4=-1,5\%$, всего лишь на 15% ниже, чем в 1D-расчете и в ~7 раз выше экспериментального значения.

*) S.V. Weber, et al, Simulations of indirectly driven gas-filled capsules at the National Ignition Facility, Physics of Plasmas 21, 112706 (2014)

Конфигурация сжатой мишени в 2D- расчете по ТИГР-3Т не противоречат экспериментальным нейтронным и рентгеновским изображениям



Нейтронное (слева) и рентгеновское (справа) изображение в опыте N120923^{*)}



Температура ионов (слева) и плотность (справа) на момент максимума скорости ДТ-реакции в расчете с асимметрией в потоке излучения $2a_4=3\%$

^{*)} S.V. Weber, et al, Simulations of indirectly driven gas-filled capsules at the National Ignition Facility, Physics of Plasmas 21, 112706 (2014)

Результаты опыта с СН-оболочкой, заполненной $D_{0,75}T_{0,25}$ -газом, и 1D-расчетов по программе ЭРА

№	Опыт / Расчет	N_{dt} 10^{15}	N_{dd} 10^{13}	$T_{i,dt}$ кэВ	$T_i(0)$ кэВ	t_γ (нс)	M_{clean} (%)	L_{mix} (μm)	Примечания
1	Опыт ¹⁾ N120923	0,67	0,75	3,06	-	22,45	-	~ 2	-
2	1D-ЭРА_ $D_{0,75}T_{0,25}$	1,9	2,5	2,4	3,9	22,37	-	-	Спектральный перенос излучения*)
3	1D-ЭРА_ $D_{0,75}T_{0,25}$	1,6	2,0	2,3	3,8	22,37	~20	~3	Спектр. пер. излучения*) кЭ-модель с $L_\theta=2$ мкм
4	1D-ЭРА $D_{0,69}T_{0,23}C_{0,04}H_{0,04}$	0,55	0,78	1,8	3,3	22,37	-	-	Спектральный перенос излучения*)

Здесь: N_{dt} и N_{dd} – выходы ДТ- и ДД- нейтронов; $T_{i,dt}$ – экспериментальные и расчетные ионные температуры (средние по ДТ-газу); $T_i(0)$ – ионные температуры в центре мишени; t_γ – время срабатывания мишени; M_{clean} (%) - доля массы ДТ, не перемешанного с оболочкой; L_{mix} – Лагранжева толщина слоя оболочки, перемешанного с ДТ к моменту максимального сжатия мишени.

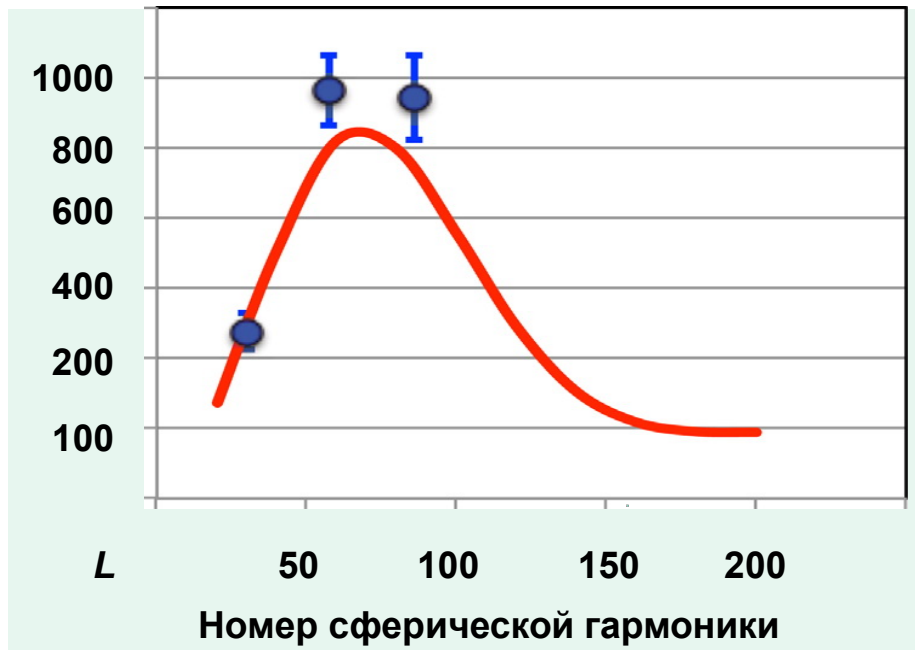
*) В расчетах пробеги излучения, сосчитанные по программе RESEOS, были уменьшены в 2 раза, чтобы согласовать времена работы мишени.

Модель RESEOS : Ovechkin A.A., Loboda P.A., Novikov V.G. et al, HEDP, 1 (13), 20 – 33 (2014).

Расчетный нейтронный выход близок к экспериментальному, если масса СН, однородно намешанного в газ, составляет $\Delta M \sim 25\%$ от массы газа или $\Delta M \sim 7,1$ мкг.

*) S.V. Weber, et al, Simulations of indirectly driven gas-filled capsules at the National Ignition Facility, Physics of Plasmas 21, 112706 (2014)

Моделирование развития коротковолновых возмущений при сжатии газонаполненных оболочек по программе ТИГР-3Т



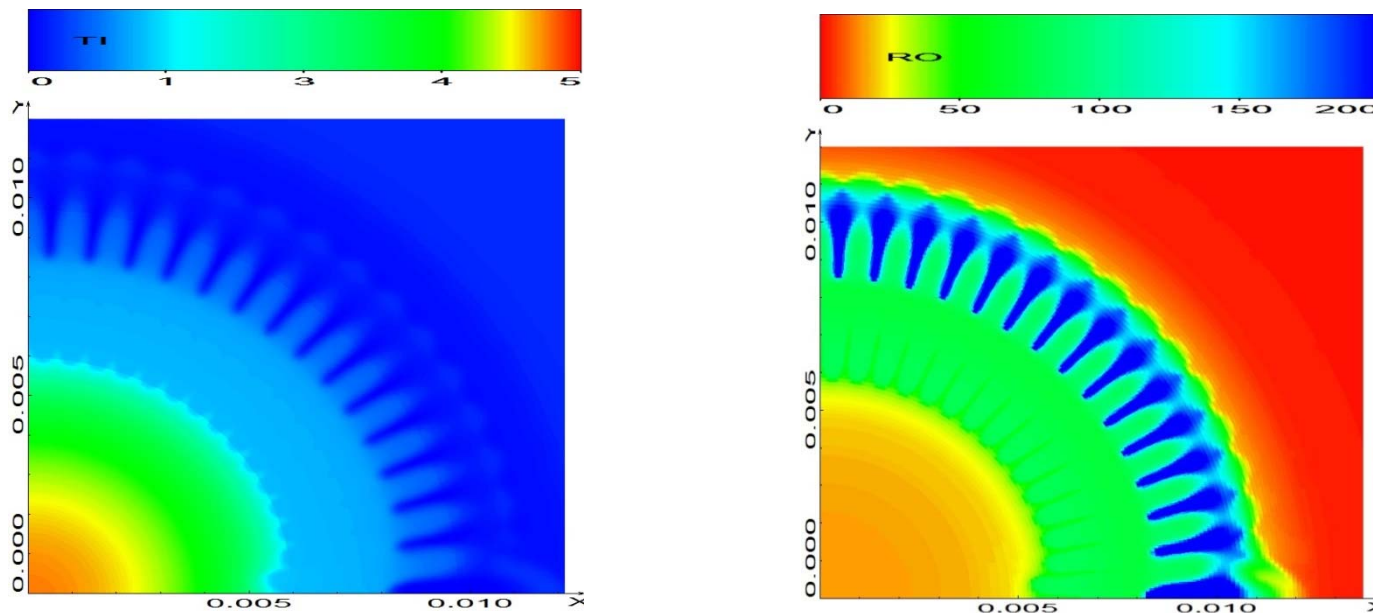
Измеренный (символы) и расчетный (кривая) рост возмущений оптической толщины ($\delta \int \rho dr$) оболочки от номера сферической гармоники (L) на момент 20,3 нс, когда оболочка имеет радиус 650 мкм при ее начальном внешнем радиусе ~ 1120 мкм (из работы [1])

Результаты 2D- моделирования по программе ТИГР-3Т

L	30	60	90
$\frac{\delta \int \rho dr}{\delta \int \rho_0 dr_0}$	40	650	1000

Для нескольких номеров гармоник (L) рассчитан рост вариации оптической толщины оболочки к моменту 20,3 нс, когда оболочка имеет радиус 650 мкм

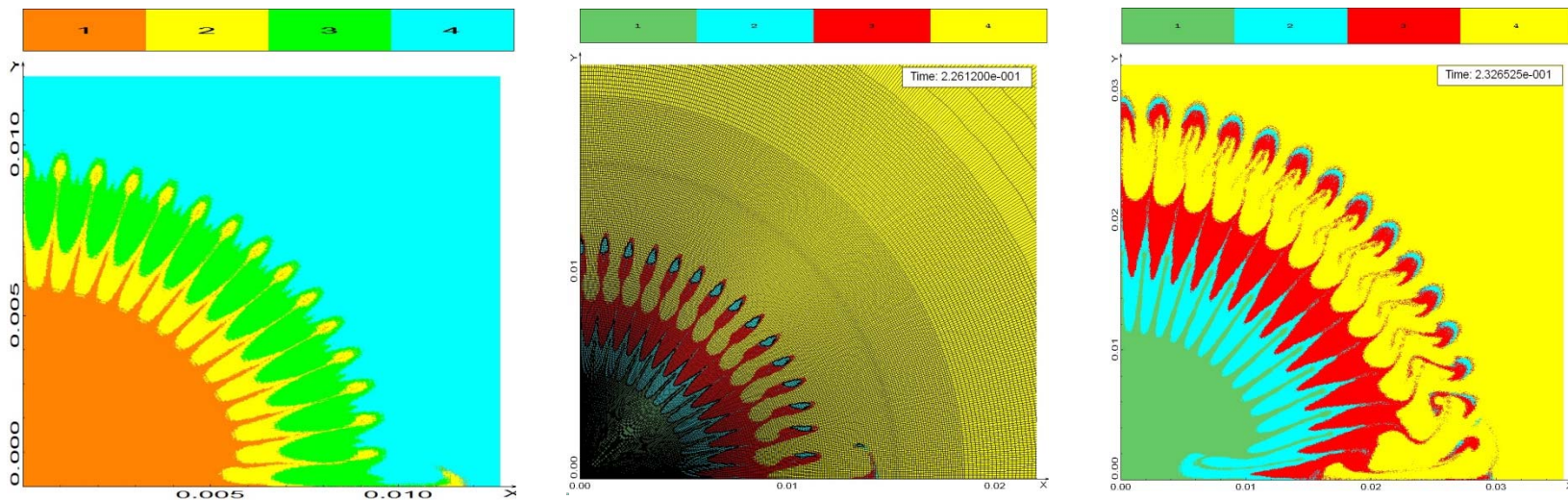
Моделирование по ТИГР-3Т роста 60-ой гармоники возмущений наружной границы оболочки с начальной амплитудой $\delta_{60} = 10$ нм.



Профили температуры ионов (слева) и плотности (справа) на момент максимальной скорости ДТ-реакций в газе ($t_{\text{DT,max}} = 22,41$ нс) в расчете ТИГР-3Т для 60-ой гармоники возмущения оболочки с начальной амплитудой $\delta_{60} = 10$ нм. Размеры по осям–в [см].

Начальные возмущения выросли в $\sim 5 \cdot 10^3$ раз. Однако, потери в сжатии газа и ионной температуре незначительны.

Моделирование по ТИГР-3Т роста 60-ой гармоники возмущений наружной границы оболочки с начальной амплитудой $\delta_{60} = 10$ нм.



Конфигурации первых 4-х областей мишени на три момента времени:

$t_{\langle DT \rangle_{\max}} = 22,40$ нс - момент максимальной скорости ДТ-реакций в газе (слева);

$t_{\rho, \max} = 22,61$ - момент максимального сжатия газа (в центре; показана сетка);

$t_{\text{fin}} = 23,26$ нс - момент окончания счета (справа). Размеры по осям – в см.

Центральная, горячая область топлива не засорена материалом оболочки, поэтому снижения в выходе ДТ-нейтронов по сравнению с 1D-расчетами практически не было. Экспериментальный нейтронный выход в ~ 3 раза ниже, чем в 1D-расчете с учетом спектрального переноса излучения при величине схождения по радиусу ~ 15 .

Влияние различных факторов на нейтронный выход согласно расчетам ЛНЛ (HYDRA code) для опытов, проведенных на NIF с газонаполненными оболочками

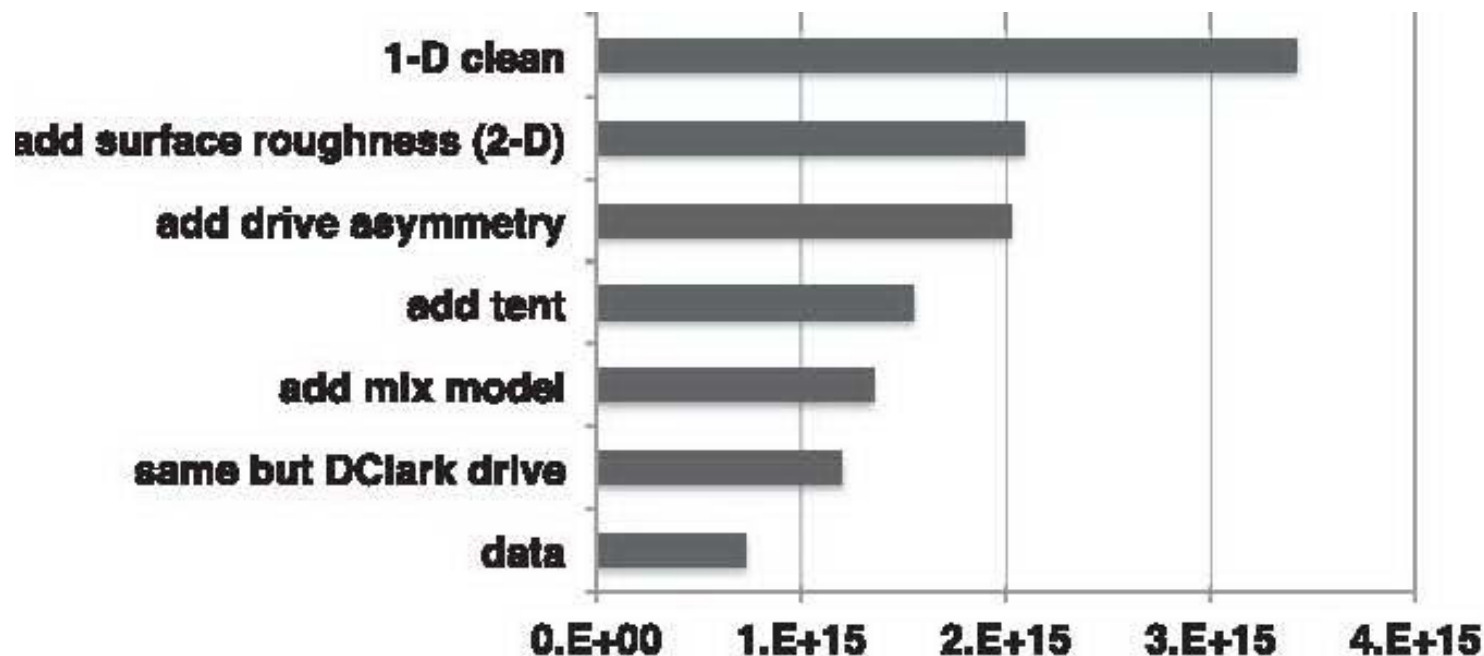


Диаграмма из работы [1], которая иллюстрирует влияние различных факторов на расчетное снижение нейтронного выхода в опытах, проведенных на установке NIF с газонаполненными оболочками

Согласно расчетам ЛНЛ существует масса причин, которые приводят к снижению нейтронного выхода в экспериментах, проведенных на установке NIF с газонаполненными оболочками.

1. 1D-расчеты с $k\epsilon$ -моделью турбулентного перемешивания хорошо описывают экспериментальную зависимость выхода ДТ-нейтронов от толщины «запирающего» слоя, полученную в опытах на установке NIF по изучению атомарного перемешивания. Однако, необходимо уточнение интерпретации этих опытов с учетом диффузии ионов вблизи границы газа и оболочки.
2. В 2D расчетах по программе ТИГР-ОМЕГА-3Т с асимметрией в потоке излучения в виде 4-ой гармоники и полной амплитудой - 3%, получены параметры и конфигурация сжатого газа, близкие к экспериментальным.
3. Расчеты по программе ТИГР-3Т дают близкий к экспериментальным данным рост амплитуды возмущений на фронте абляции в $\sim 10^3$ раз для номеров гармоник $l \sim 60-90$ на момент схождения оболочки по радиусу ~ 2 раз.
4. Можно согласиться с авторами опубликованных работ что, к засорению газа и снижению нейтронного выхода в экспериментах на установке NIF приводит рост длинноволновых возмущений за счет системы подвеса мишени и капилляра, а также дефектов на поверхности оболочек.

СПАСИБО ЗА ВНИМАНИЕ