

Стендовый доклад на XVI Международной конференции «Забабахинские научные чтения»
(29 мая - 02 июня 2023 г., Снежинск, Челябинская обл., Россия)

Моделирование развития гидродинамических неустойчивостей и перемешивания в лазерных мишенях прямого облучения по комплексам ТИГР-3Т и ОМЕГА-3Т

Д.В. Дембовский, В.А. Лыков, Л.В. Соколов, Д.В. Химич, А.Н. Шушлебин

e-mail: v.a.lykov@vniitf.ru

РФЯЦ-ВНИИТФ им. академика Е.И. Забабахина, Снежинск, Россия

Аннотация

Представлены результаты расчётов, произведённых по двумерным программным комплексам ТИГР-3Т и ОМЕГА-3Т с использованием двумерной полуэмпирической $k\epsilon$ -модели турбулентного перемешивания для изучения влияния гидродинамических неустойчивостей и турбулентного перемешивания на сжатие и термоядерное горение одно- и двухкаскадных конструкций мишеней прямого облучения для мегаджоульных лазерных установок. Согласно ранее проведённым расчётам однокаскадной мишени длинноволновые возмущения с номерами гармоник $l \sim 4-12$ и амплитудой $A \sim 1\%$ в асимметрии поглощённой лазерной энергии не приводят к сильному снижению выхода термоядерной энергии. Для данной мишени чрезвычайно опасными оказываются коротковолновые возмущения: 60-я гармоника с амплитудой $A \sim 0,1\%$ или возмущения, заданные в начальный момент времени на границе топлива и аблятора всего с амплитудой $\delta \sim 10^{-6}$ см, которые приводят к снижению выхода термоядерной энергии в 2-3 раза. При этом дополнительный учет турбулентного перемешивания уменьшает вероятность зажигания мишени. При сжатии двухкаскадных мишеней происходит эффективное сглаживание возмущений в процессе их передачи от внешнего каскада на внутренний. В результате для возмущений в асимметрии поглощённой лазерной энергии опасными оказываются длинноволновые возмущения с 12-ой гармоникой и амплитудой $A \sim 1\%$, которые также приводят к снижению выхода термоядерной энергии в 2-3 раза. Для таких мишеней важно правильно описывать процессы развития неустойчивостей и перемешивания на границах внутреннего каскада, выполненного из материала с высоким Z . Показано, что развитие коротковолновых возмущений, проводящее к турбулентному перемешиванию является существенным препятствием на пути достижения термоядерного зажигания DT-топлива как в одно-, так и двухкаскадных мишенях инерциального термоядерного синтеза.

Введение

В экспериментах с однокаскадными мишенями, проведенными на установке NIF по схеме непрямого облучения, получен выход термоядерной энергии $E_{\text{ТЯ}} \approx 1,3$ МДж при энергии лазера $E_L \approx 1,9$ МДж [1]. Возможность термоядерного зажигания мишеней прямого облучения на мегаджоульных лазерных установках еще предстоит выяснить. Основными трудностями на этом пути являются развитие гидродинамических неустойчивостей [2] и вызванные ими процессы турбулентного перемешивания [3].

Целью проведения двумерных расчетов по программным комплексам ТИГР-ЗТ [4-6] и ОМЕГА-ЗТ [4-5] явилось изучение влияния гидродинамических неустойчивостей и обусловленного ими турбулентного перемешивания на сжатие и термоядерное горение одно- и двухкаскадных мишеней прямого облучения для мегаджоульных лазерных установок.

Программный комплекс ТИГР-ЗТ позволяет моделировать сжатие ИТС-мишеней в трехтемпературном газодинамическом приближении [7] с использованием метода концентраций [8] при больших деформациях, а ОМЕГА-ЗТ – процессы термоядерного горения с учетом кинетики термоядерных реакций, переноса энергии альфа-частицами и нейтронов DT-реакции в многогрупповом двумерном кинетическом приближении [9, 10]. В расчетах применялась усовершенствованная полуэмпирическая $k\epsilon$ -модель турбулентного перемешивания [11], по которой впервые проведены двумерные численные эксперименты с мишенями, тогда как при прямом численном моделировании перемешивания требуются огромные вычислительные ресурсы из-за конечноразностных сеток.

1. Постановка задачи

Расчёты проводились в трёхтемпературном газодинамическом приближении с учётом электронной и ионной теплопроводностей, а также переноса энергии фотонами в диффузионном приближении с ограничением потоков и $k\epsilon$ -модели турбулентного перемешивания. В расчётах использовались уравнения состояния веществ в форме, предложенной в [12], и пробеги излучения, рассчитанные по программе RESEOS [13].

Электронная теплопроводность ограничивалась предельным потоком $q_e^{nped} = f_e n_e T_e^{3/2}$ с коэффициентом $f_e \approx 0,15$.

Моделирование поглощения лазерного излучения осуществлялось заданием источника нагрева электронов в области плазмы с плотностью, близкой к критической $\rho_c (g/cm^3) = 1,66 \cdot 10^{-3} \lambda^{-2} \langle A \rangle / \langle Z \rangle$, где $\langle Z \rangle$ и $\langle A \rangle$ – средний заряд и масса ионов плазмы, а λ (мкм) – длина волны лазерного излучения. А именно, на каждый момент t для каждого азимутального угла ϑ_i в сферической системе координат определяются граничные радиусы $R_{1,2}(t, \vartheta_i)$ интервала, в котором плотность плазмы отвечает неравенству $0,5\rho_c < \rho(r, \vartheta) < \rho_c$, а в уравнении энергии для электронов задается удельная мощность источника энергии согласно формуле:

$$\frac{d^2 E(t, r, \vartheta)}{dt dm} = P_L(t) \frac{[1 + A_l \cos(l\vartheta)]}{M_c(t)}, \quad (1)$$

где: $M_c(t) = 2\pi \sum_{i=1}^{i=l} \int_{\vartheta_{i-1/2}}^{\vartheta_{i+1/2}} [1 + A_l \cos(l\vartheta)] \sin(\vartheta) d\vartheta \left| \int_{R_2(t, \vartheta_i)}^{R_1(t, \vartheta_i)} \rho(r, \vartheta_i) r^2 dr \right|$ - нормировка лазерного

источника на массу точек, в которых задается энерговыделение; A_l – амплитуда возмущений с

номером гармоники l ; $P_L(t) = E_a \cdot f(t) / \int_0^{\infty} f(t) dt$ – мощность, E_a – поглощенная мишенью

энергия лазерного излучения; $f(t)$ – форма лазерного импульса.

Однокаскадная мишень.

В качестве однокаскадной мишени рассматривалась мишень, предложенная в работе [14]. Для этой мишени опубликованы результаты двумерных расчетов [15-16], которые были по программе NUTCY [17-18] с целью изучения влияния на сжатие и термоядерное горение этой мишени длинноволновых возмущений, обусловленных дисбалансом в мощности пучков [15], промахами в их наведении на мишень [15] и одновременностью сведения пучков в центр мишенной камеры [16].

На рисунке 1 приведена начальная геометрия однокаскадной системы, в таблице 1 представлена форма лазерного импульса, бралось $\rho_c = 0.012 \text{ г/см}^3$.

Область	1		2		3		4		5		6	
R, мкм	0	1414	1421	1563	1586	1596	1597					
Вещество	DT		DT		DT		Be		Be		Be	
Плотность, г/см ³	0,0006		0,25		0,25		1,05		1,05		1,05	

Рисунок 1 – Схема однокаскадной мишени прямого облучения

Таблица 1– Форма лазерного импульса для однокаскадной мишени.

t(нс)	0,0	0,2	3,0	4,0	5,0	5,5	5,75	6,0	9,0	9,1	20
f(t)	0,0	6,0	6,0	0,12	40	98	235	400	400	0	0

Двухкаскадная мишень.

В качестве двухкаскадной мишени рассматривалась мишень, предложенная в работе [19]. Для этой мишени опубликованы результаты одномерных [19-20] и двумерных расчетов [19, 21]. Согласно этим расчетам при сжатии двухкаскадных мишеней происходит эффективное сглаживание возмущений в процессе их передачи от внешнего каскада на внутренний. В результате для возмущений в асимметрии поглощённой лазерной энергии опасными оказываются длинноволновые возмущения с 12-ой гармоникой и амплитудой $A \sim 1\%$, которые приводят к снижению выхода термоядерной энергии в 2-3 раза. Для таких мишеней важно также правильно описывать процессы развития коротковолновых возмущений и перемешивания на границах внутреннего каскада, выполненного из материала с высоким Z.

На рисунке 2 приведена начальная геометрия двухкаскадной системы, в таблице 2 представлена форма лазерного импульса, бралось $\rho_c = 0.0132 \text{ г/см}^3$.

Область	1		2		3		4		5		6		7	
R _i (мкм)	0	325	330	370	390	1585	1615	1655						
Вещество	DT		Be		Au		Be		CH		Be		Be	
ρ (г/см ³)	0,2		1,8		19,6		1,8		0,03		1,8		1,8	

Рисунок 2— Схема двухкаскадной мишени прямого облучения

Таблица 2– Форма лазерного импульса у двухкаскадной мишени.

t(нс)	0,0	0,2	0,4	1,6	1,8	3,0	3,3	8,5	8,8	20
f(t)	0,0	300	0,0	0,0	150	150	300	300	0	0

2. Результаты расчетов однокаскадной мишени

В одномерных расчетах однокаскадной конструкции мишени [14], проведенным по двумерным программным комплексам ТИГР-3Т и ОМЕГА-3Т выход термоядерной энергии составил $E_{\text{тя}} \approx 41,4$ МДж при вложенной в мишень энергии лазерного излучения $E_a=1,5$ МДж с длиной волны $\lambda=0,53$ мкм (вариант 1 в таблице 3 и 4).

В таблице 3 перечислены варианты проведенных расчетов с описанием исходных данных, которые соответствуют строкам таблицы 4. В таблице 4 и на рисунках 3-5 представлены результаты двумерных расчетов мишени [14].

Гидродинамическая неустойчивость и турбулентное перемешивание развиваются в окрестности границы между DT слоем и оболочкой с внутренним радиусом ($R_{30}=1563$ мкм), что имеет место при сжатии и торможении неиспаренной массы аблятора. В расчетах варианты 2 и 5 таблицы 3 на указанной границе задавалось гармоническое возмущение в геометрии поверхности оболочки следующего вида: $R_3(\vartheta) = R_{30} + \delta_0 \cos(l\vartheta)$, где l –номер гармоники возмущений по углу (ϑ_i) с амплитудой (δ_0).

В расчетах варианты 3-5 и 7 из таблиц 3 и 4, проведенных с учетом $k\varepsilon$ -модели турбулентного перемешивания [11], на границе R_{30} задавались: l –номер гармоники возмущений, амплитуда возмущения (a_0) и длина волны (λ_0), определяемая выражением $\lambda_0 = 2\pi R_{30} / l$. Переход к расчету турбулентного перемешивания осуществлялся в момент времени ($t \approx 9$ нс), когда достигалось условие, что отношение амплитуды возмущения к длине волны $a(t)/\lambda(t) \approx 1$. Так в расчете (вариант 2 таблиц 3, 4) для 60-ой гармоники рост амплитуды границы $\delta(t)$ способствовал переходу к использованию метода концентраций, что принималось за начало турбулентного перемешивания. По состоянию мишени сформировались исходные турбулентные параметры для расчетов с учетом $k\varepsilon$ -модели. Для варианта 2 из таблицы 4 снижение термоядерного выхода к одномерному без возмущений составило $N_{2D}/N_{1D} = 78\%$.

Расчет термоядерного энерговыделения по комплексу ОМЕГА-3Т начинался с разреза ТИГР-3Т в момент, когда $T_i = 1$ кэВ в центральной области с DT-газом. Курсивом выделены слои, в которые проникает материал оболочки из Be в расчетах на неустойчивость и перемешивание. Так результаты двумерных расчетов варианты 2 и 5 таблицы 4 показывают, как влияют на термоядерное горение возмущения в геометрии изготовления оболочки и турбулентное перемешивания по отдельности по отношению к сферически-симметричному сжатию, а также при совместном учете этих двух факторов.

В одномерных расчетах варианты 3 и 4 таблицы 4 с учетом турбулентного перемешивания, в которых варьировалась амплитуда начальных возмущений a_0 на границе $R_{30}=1563$ мкм, получено снижение термоядерного выхода до уровня $N_{2D}/N_{1D} = 91\%$ и $N_{2D}/N_{1D} = 94\%$ при $a_0 = 0,1637$ мкм и $a_0 = 10^{-2}$ мкм соответственно.

Результаты расчетов варианты 6 и 7 таблицы 4 показывают, как влияют на термоядерное горение возмущения 60-ой гармоники с амплитудой $A_l = 0,1\%$ в поглощенном потоке без учета (вариант 6) и с учетом (вариант 7) турбулентного перемешивания. В вариантах 6 и 7 снижение термоядерного выхода составило $N_{2D}/N_{1D} = 63\%$ и $N_{2D}/N_{1D} = 15\%$ соответственно. Результаты проведенных расчетов при совместном учете гидродинамических неустойчивостей и турбулентного перемешивания указывают, что вероятность зажигания мишени существенно уменьшается.

На рисунке 3 показано состояния мишени на момент максимума ионной температуры DT в расчете (вариант 5 таблица 4) по комплексу ТИГР-3Т, где видно, что первые два слоя мишени еще не перемешаны. На рисунке 4 показано состояния мишени при максимальном сжатии DT в расчете (вариант 5 таблица 4) по комплексу ОМЕГА-3Т, когда в центре идет активное термоядерное горение и образовалась зона с высокой температурой, что способствует заглаживанию возмущений в плотности и ионной температуре. Так в вариантах 2, 4 и 5 таблица 4 снижение термоядерного выхода N_{2D}/N_{1D} составило 78%, 94% и 67% соответственно.

В расчете (вариант 7 таблица 4) с возмущением в поглощенном потоке учет турбулентного перемешивания вводился в момент $t=8,5$ нс, когда был переход на метод концентраций в расчете (вариант 6). На рисунке 5 показаны состояния мишени на момент максимума ионной температуры DT в расчете (вариант 7 таблица 4) по ТИГР-3Т, видно только часть первого слоя DT в мишени еще не замешана. Мишень в этом случае не загорелась, поэтому двумерные распределения функций в мишени для варианта 7 в расчете по ОМЕГА-3Т не приведены, т.к. они практически повторяют полученные распределения по ТИГР-3Т.

3. Результаты расчетов двухкаскадной мишени

Результаты расчетов двухкаскадной конструкции мишени в таблице 5 проведены в одномерной постановке по программным комплексам ТИГР-3Т и ОМЕГА-3Т с учетом $k\varepsilon$ -модели турбулентного перемешивания. При вложенной в мишень энергии лазерного излучения $E_a=1,8$ МДж с длиной волны $\lambda=0,53$ мкм выход термоядерной мишени без перемешивания составил $E_{Tя} \approx 4,84$ МДж.

В расчетах с учетом $k\varepsilon$ -модели инициализация турбулентного перемешивания вводилась нижней ($R=330$ мкм) и верхней ($R=370$ мкм) границах слоев из Au и Be, где задавались $l=60$ – номер гармоники возмущений и амплитуда возмущения a_0 длина волны λ_0 . Оценивалось развитие роста возмущений при гравитационной неустойчивости (Рэлея – Тейлора) и когда отношение амплитуды возмущения к длине волны $a(t)/\lambda(t) \approx 2$ и включался расчет турбулентного перемешивания.

В расчете №2 таблица 5 переход к расчету перемешивания произошел в момент времени ($t=9,81$ нс) на нижней границе слоя из Au, тогда как на верхней границе указанные условия одновременно не были выполнены. В расчете №3 таблица 5 переход к расчету перемешивания произошел сначала в момент времени ($t= 9,34$ нс) на верхней границе слоя из Au, а затем при реализации условий перемешивание включилось на верхней границе слоя в момент времени ($t= 9,81$ нс). Видно, что с увеличением амплитуды возмущения на границах слоя из Au, имеет место уменьшение энерговыделения мишени. Так в расчетах (варианты 2 и 3 таблица 5) получено снижение термоядерного выхода до уровня $N_{2D}/N_{1D} =64\%$ и $N_{2D}/N_{1D}=34\%$ при $a_0/\lambda =1\%$ и $a_0/\lambda=5\%$ соответственно. Это указывает, что для коротковолновых возмущений увеличение начальной амплитуды возмущения приводит к снижению термоядерного выхода из мишени при учете турбулентного перемешивания, т.е. начальные возмущения в $k\varepsilon$ -модели не забываются.

В таблице 6 приведено сравнение для двухкаскадной мишени одномерного расчета и расчета с возмущением в поглощенном потоке лазерной энергии на $l = 12$ гармонике с амплитудой возмущения по азимутальному углу $A_l = 0,1\%$. На рисунке 6 показаны состояния мишени на момент времени (9,94 нс) при достижении максимальной температуры в DT из расчета ТИГР-3Т и момент времени (9,89 нс) максимального сжатия DT из расчета ОМЕГА-3Т. Сложные двумерные течения веществ указывают, что при образовании струй возникает сдвиговая неустойчивость на ряду с гравитационной. Получено снижение

термоядерного выхода до уровня $N_{2D}/N_{1D} = 60\%$. Видно, что длинноволновые возмущения на 12 гармонике в лазерном потоке энергии дают значительное снижение в термоядерной энергии мишени. Следует отметить, что не проводился учет влияния турбулентного перемешивания, которое вызывается действием коротковолновых возмущений. При взаимном влиянии на термоядерное горение мишени гидродинамических неустойчивостей и турбулентного перемешивания возможны еще большие потери в энергии.

Двумерных расчеты двухкаскадной мишени с учетом $k\varepsilon$ -модели турбулентного перемешивания в настоящее время проводятся по программам ТИГР-3Т и ОМЕГА-3Т и результаты этих расчетов будут представлены после их завершения и анализа.

Заключение

По двумерным программным комплексам ТИГР-3Т [4-6] и ОМЕГА-3Т [4-5] с использованием двумерной полуэмпирической $k\varepsilon$ -модели турбулентного перемешивания [11] проведены расчеты сжатия и горения одно- и двухкаскадной мишеней прямого облучения для мегаджоульных лазерных установок. Показано, что развитие коротковолновых возмущений, проводящее к турбулентному перемешиванию, является опасным препятствием на пути достижения термоядерного зажигания мишеней ИТС.

Литература

1. A. L. Kritcher, A. B. Zylstra, D. A. Callahan, et al., Phys. Rev. E (2022) 106, 025201.
2. R. S. Craxton, et al., Phys. Plasmas (2015) 22, 110501.
3. В.А.Лыков, В.А.Мурашкина, В.Е.Неуважаев, Л.И.Шибаршов, В.Г.Яковлев, Влияние турбулентного перемешивания на сжатие оболочечных мишеней Письма в ЖЭТФ, т. 30, в.6, 1979, стр. 339-342.
4. Е.Н. Аврорин, Н.Г. Карлыханов, М.Ю. Козманов, В.А. Лыков, К.А. Мустафин, В.Е. Неуважаев, Л.В. Соколов, В.Д. Фролов, В.Е. Черняков, А.Н. Шушлебин. 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.
5. А.Н. Шушлебин, К.А. Мустафин, В.А. Лыков, В.Д. Фролов, Р.Т. Дылдина, И.А. Кузнеченкова, Е.Л. Лягина, В.Р. Надточий, С.Я. Сенников, К.И. Смирнова, Л.В. Соколов, Г.Л. Язовских, Двумерные расчеты сжатия и горения мишеней для ЛТС с непрямым воздействием по комплексам программ ТИГР-3Т и ОМЕГА-3Т//Труды Международной конференции «V Забабахинские научные чтения», 21-25 сентября 1998, Снежинск, Часть 1, стр., Снежинск, 1999.
6. Бисярин А.Ю., Грибов В.М., Зубов А.Д., Первиненко Н.В., Неуважаев В.Е., Фролов В.Д. Комплекс ТИГР для расчета двумерных задач математической физики// ВАНТ (серия Математическое моделирование физических процессов), вып. 3 (17), 34 (1984).
7. Шушлебин А.Н., Фролов В.Д., Лыков В.А. //Вычислительные технологии т. 4, No 13, Новосибирск, стр.336-345, (1995).
8. Шушлебин А.Н., Дылдина Р.Т., Кузнеченкова И.А. и др. Расчеты с учетом больших деформаций термоядерных мишеней непрямого облучения для лазерной установки ИСКРА// Доклад на конференции «IX Забабахинские научные чтения», Снежинск, Россия, 2007.
9. Аврорин Е.Н., Бунатян А.А., Гаджиев А.Д., Мустафин К.А., Нурбаков А.Ш., Писарев В.Н., Феоктистов Л.П., Фролов В.Д., Шибаршов Л.И.// Физика плазмы, 10, вып. 3 (1984).
10. А.Д. Гаджиев, О.С. Широковская// Журнал. Выч. Мат. и Математической физики, 6, 1605-1609 (1976).
11. М.И. Авраменко, О к ϵ -модели турбулентного перемешивания. Издательство РФЯЦ-ВНИИТФ, Снежинск, 2010.
12. Г.М. Елисеев, Г.Е. Клинишов. Уравнение состояния твердых веществ и его сплайн-аппроксимация //ИПМ им. М.В. Келдыша АН СССР, препринт №173, М. 1982.
- 13.(16)A.A. Ovechkin, P.A. Loboda, V.G. Novikov, A.S. Grushin, A.D. Solomyannaya. RESEOS – a model of thermodynamic and optical properties of hot and warm dense matter// HEDP 13, 20 – 33 (2014).
14. С. А. Бельков, С. В. Бондаренко, Г. А. Вергунова и др.// ЖЭТФ 148, 784 (2015)
15. С. А. Бельков, С. В. Бондаренко, Г. А. Вергунова и др.// ЖЭТФ 151, 396 (2017).
16. С. А. Бельков, С. В. Бондаренко, Г. А. Вергунова и др.//ЖЭТФ, 154, 629–640 (2018)
17. В. Ф. Тишкин, В. В. Никишин, И. В. Попов, А. П. Фаворский, Матем. моделирование 7(5), 15 (1995).
18. И. Г. Лебо, В. Ф. Тишкин, Исследование гидродинамической неустойчивости в задачах лазерного термоядерного синтеза методами математического моделирования, Физматлит, Москва (2006).
19. S. X. Hu, R. Epstein, W. Theobald, et al., Direct-drive double-shell implosion: A platform for burning-plasma physics studies// Phys.Rev. E 100, 063204 (2019).

20. В.А. Лыков, Е.С. Андреев, Е.С. Бакуркина, Н.Г. Карлыханов, Г.Н. Рыкованов, и В.Е. Черняков, Одномерные расчеты двухкаскадной мишени прямого облучения для мегаджоульных установок с длиной волны лазерного излучения 0,35 мкм и 0,53 мкм. Забабахские научные чтения: сборник материалов XV Международной конференции 27 сентября -1 октября 2021. – Снежинск: Издательство РФЯЦ-ВНИИТФ, 2021. стр.94.
21. Д.В. Дембовский, В.А. Лыков, Л.В. Соколов и А.Н. Шушлебин, Расчеты сжатия и термоядерного горения двухкаскадной мишени прямого облучения для мегаджоульной установки по двумерным программным комплексам ТИГР-ЗТ И ОМЕГА-ЗТ. Стендовый доклад на XV-ой Международной конференции «Забабахские научные чтения» (27 сентября -1 октября 2021г., Снежинск, Челябинская обл., Россия). Сборник аннотаций, стр.94.

Таблица 3. Постановка расчётов однокаскадной мишени по комплексам ТИГР-3Т и ОМЕГА-3Т

№ вариант а	Описание
1	Одномерный расчёт без возмущений
2	Двумерный расчёт при возмущении в геометрии границы ($R_{30}=1563\text{мкм}$): <ul style="list-style-type: none"> • гармоника $l = 60$ с амплитудой возмущений $\delta_0 = 10^{-6}$ см.
3	Одномерный расчёт с учётом турбулентного перемешивания: <ul style="list-style-type: none"> • $k\varepsilon$-модель: гармоника $l = 60$, длина волны возмущения $\lambda_0 = 16,37\text{мкм}$ с амплитудой $a_0 = 0,1637\text{мкм}$ на границе ($R_{30}=1563\text{мкм}$).
4	Одномерный расчёт с учётом турбулентного перемешивания: <ul style="list-style-type: none"> • $k\varepsilon$-модель: гармоника $l = 60$, длина волны возмущения $\lambda_0 = 163,7\text{мкм}$ с амплитудой $a_0 = 10^{-2}$ мкм на границе ($R_{30}=1563\text{мкм}$).
5	Двумерный расчёт с учётом турбулентного перемешивания при возмущении в геометрии границы ($R_{30}=1563\text{мкм}$): <ul style="list-style-type: none"> • гармоника $l = 60$ с амплитудой возмущений $\delta_0 = 10^{-6}$ см • $k\varepsilon$-модель: гармоника $l = 60$, длина волны возмущения $\lambda_0 = 163,7\text{мкм}$ с амплитудой $a_0 = 10^{-2}$ мкм на границе ($R_{30}=1563\text{мкм}$).
6	Двумерный расчёт при возмущении возмущением в лазерном источнике: <ul style="list-style-type: none"> • гармоника $l = 60$ с амплитудой возмущений поглощенной мишенью лазерной энергии по азимутальному углу $A_l = 0,1\%$
7	Двумерный расчёт с учётом турбулентного перемешивания при возмущении возмущением в лазерном источнике: <ul style="list-style-type: none"> • гармоника $l = 60$ с амплитудой возмущений поглощенной мишенью лазерной энергии по азимутальному углу $A_l = 0,1\%$ • $k\varepsilon$-модель: гармоника $l = 60$, длина волны возмущения $\lambda_0 = 163,7\text{мкм}$ с амплитудой $a_0 = 10^{-2}$ мкм на границе ($R_{30}=1563\text{мкм}$).

Таблица 4. Результаты расчетов однокаскадной мишени по комплексам ТИГР-3Т и ОМЕГА-3Т

№ варианта таблицы 3	Обл. DT	$\langle \rho_{\max} \rangle$ t_{\max}	$\langle T_{i,\max} \rangle$ $t_{i,\max}$	N_{DT} 10^{18}	Етя МДж	η_T %	$\langle \hat{\rho}_{\max} \rangle$ г/см ³	$\langle \hat{T}_{i,\max} \rangle$ кэВ	N_{2D}/N_{1D}
1	1	59,0 9,87	10,9 9,74	14,7	41,4	32,6	61,7	81,4	-
	2	77,4 9,87	5,95 9,79			30,2	60,4	74,7	
2	1	43,9 9,85	11,0 9,74	11,4	32,0	30,2	41,8	56,1	0,78
	2	62,2 9,85	5,6 9,75			26,4	46,5	47	
3	1	58,5 9,87	10,1 9,74	13,4	37,8	31	58,5	75,6	0,91
	2	49,8 9,87	5,28 9,79			28,8	57,7	69,1	
4	1	41,5 9,86	10,8 9,7	13,8	39,0	31,2	59,9	77,7	0,94
	2	57,6 9,86	5,57 9,73			24,1	58,8	71,2	
5	1	41,5 9,86	10,76 9,73	9,78	27,61	28,1	43,2	37,8	0,67
	2	57,6 9,86	5,59 9,73			24,1	46,3	33,9	
6	1	36,5 9,85	10,7 9,68	9,2	23,1	26,2	32,6	34,5	0,63
	2	52,8 9,85	5,2 9,73			21,3	38,6	30,6	
7	1	24,5 9,72	8,85 9,54	2,2	0,075	2,2	24,2	9,2	0,15
	2	0,53 9,72	0,98 9,72			0,31	0,5	1,11	

Примечание к таблице 4. Обозначения $\langle \rho_{\max} \rangle$, (г/см³) и t_{\max} (нс) – максимальная средняя плотность DT-топлива и момент максимального сжатия DT-топлива в расчетах без учета т.я. энерговыделения по комплексу программ ТИГР-3Т; $\langle T_{i,\max} \rangle$, (кэВ) и $t_{i,\max}$ (нс) – максимальная средняя температура ионов в DT-топливе и соответствующий момент в расчетах с учетом т.я. энерговыделения по ОМЕГА-3Т; N_{DT} – выход нейтронов DT-реакции; Етя– выход т.я. энергии; η_T – выгорание трития по областям 1-3; N_{2D}/N_{1D} – отношение выхода нейтронов в двумерном расчете к одномерному; курсивом выделены плотности в слоях, у которых замешаны вещества DT и аблятора.

Таблица 5. Результаты расчетов двухкаскадной мишени по комплексам ТИГР-ЗТ и ОМЕГА-ЗТ с турбулентным перешиванием

№	Кε	l	a_0/λ_0	$\langle \rho_{\max} \rangle_{t_{\max}}$	$\langle T_{i,\max} \rangle_{t_{i,\max}}$	Ndt 10^{18}	Етя МДж	η _Г %	$\langle \hat{\rho}_{\max} \rangle$ г/см ³	$\langle \hat{T}_{i,\max} \rangle$ кэВ	Nкε/ N _{ID}
1	-	-	-	352 9,94	3,95 9,92	1,72	4,84	49,7	169,6	60,9	-
2	+	60	0,01	532 9,95	3,33 9,92	1,11	3,13	32,1	339,5	25,5	0,64
3	+	60	0,05	334 9,91	2,92 9,8	0,59	1,65	17	239,9	15,2	0,34

Таблица 6. Результаты расчетов двухкаскадной мишени по комплексам ТИГР-ЗТ и ОМЕГА-ЗТ с гидродинамической неустойчивостью

№	l	A _l %	$\langle \rho_{\max} \rangle_{t_{\max}}$	$\langle T_{i,\max} \rangle_{t_{i,\max}}$	Ndt 10^{18}	Етя МДж	η _Г %	$\langle \hat{\rho}_{\max} \rangle$ г/см ³	$\langle \hat{T}_{i,\max} \rangle$ кэВ	Nкε/ N _{ID}
1	-	-	352 9,94	3,95 9,92	1,72	4,84	49,7	169,6	60,9	-
2	12	1	369 9,94	3,12 9,87	1,04	2,92	29,9	313	18,7	0,60

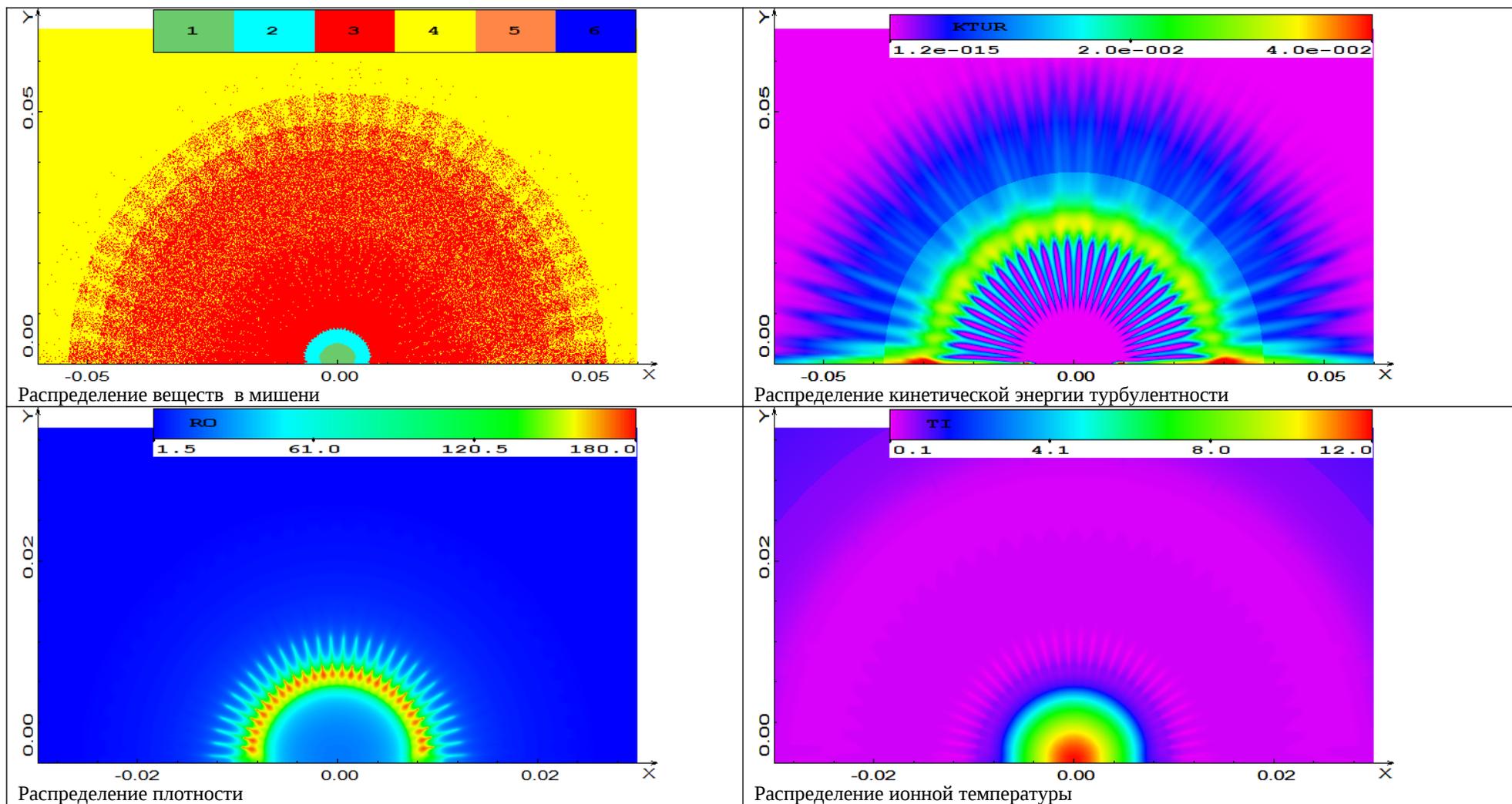


Рисунок 3 — Распределения температур ионов, плотности, кинетической энергии турбулентности и веществ в расчетах ТИГР -ЗТ на момент максимальной ионной температуры DT ($t_{Ti \max}=9,74$ нс). Результаты 2D-расчета с учетом турбулентного перемешиванием для варианта 5 из таблиц 3, 4 с заданием начального возмущения в виде 60-ой гармоники с амплитудой $\delta_0 = 10^{-6}$ см на границе DT и Be ($R_{30}=1563$ мкм).

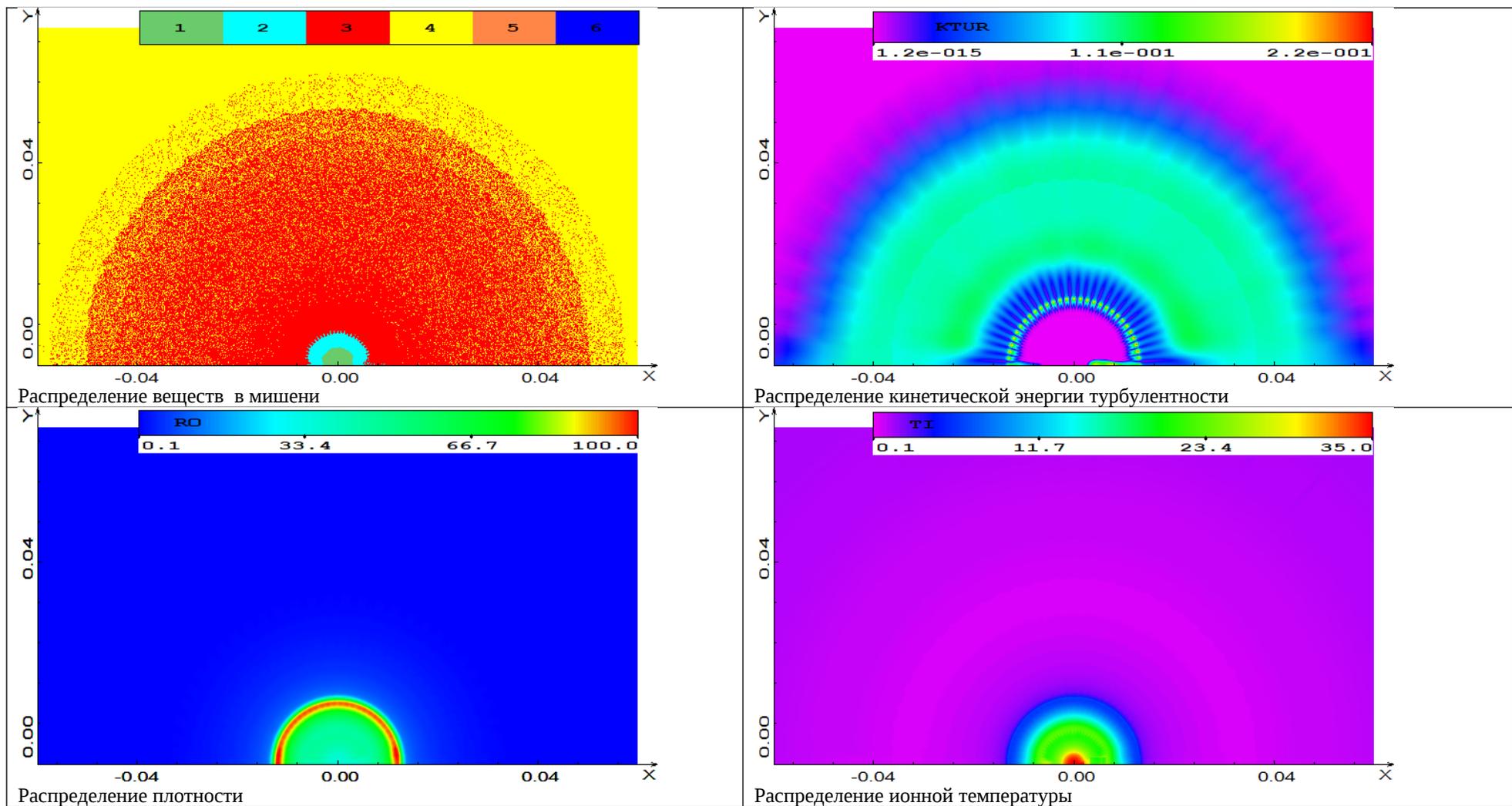


Рисунок 4 — Распределения температур ионов, плотности, кинетической энергии турбулентности и веществ в расчетах ОМЕГА-3Т на момент максимального сжатия DT ($t_{p\max}=9,8\text{нс}$). Результаты 2D-расчета с учетом турбулентного перемешиванием для варианта 5 из таблиц 3, 4 с заданием начального возмущения в виде 60-ой гармоники с амплитудой $\delta_0=10^{-6}\text{см}$ на границе DT и Be ($R_{30}=1563\text{мкм}$).

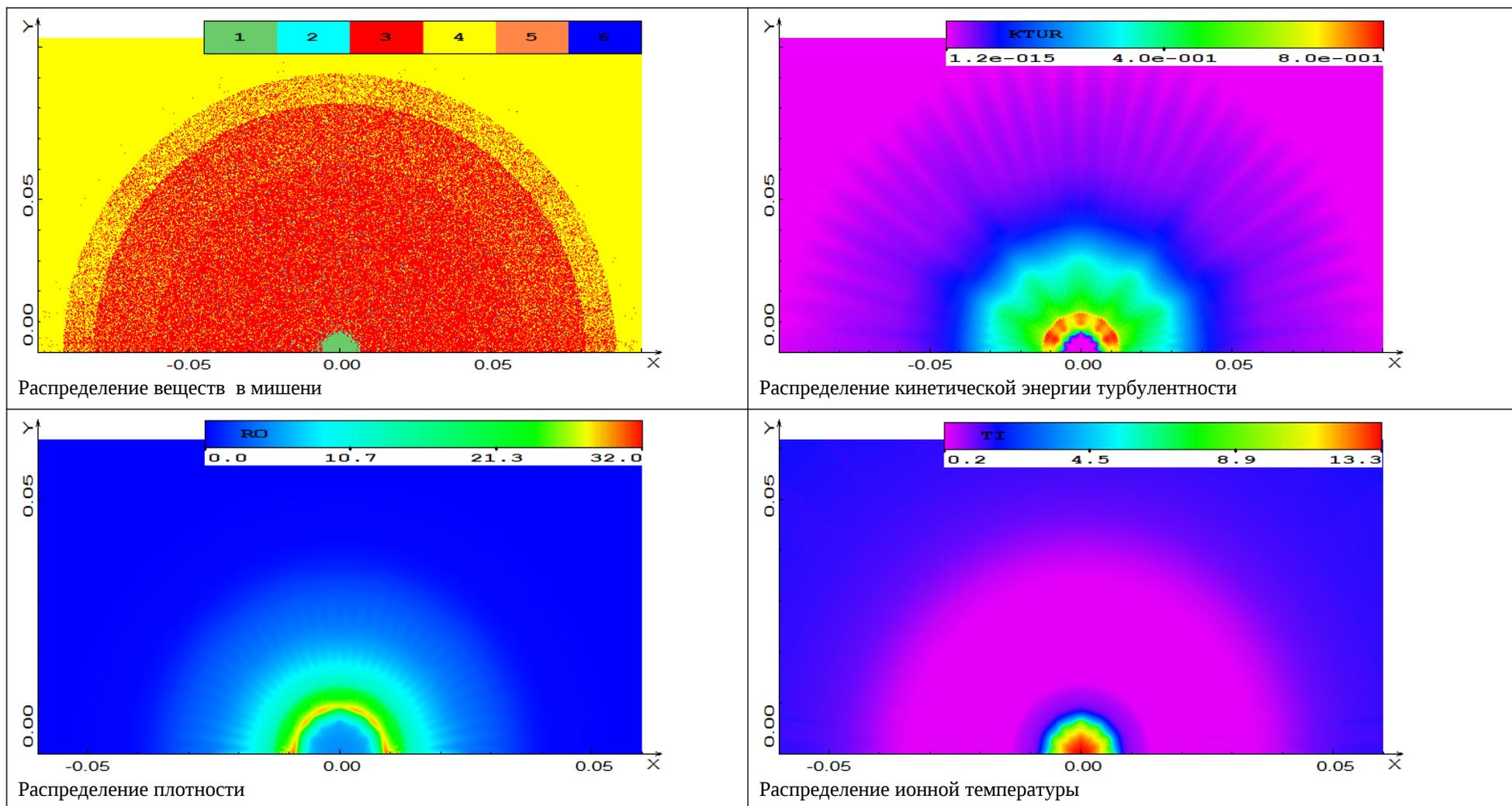
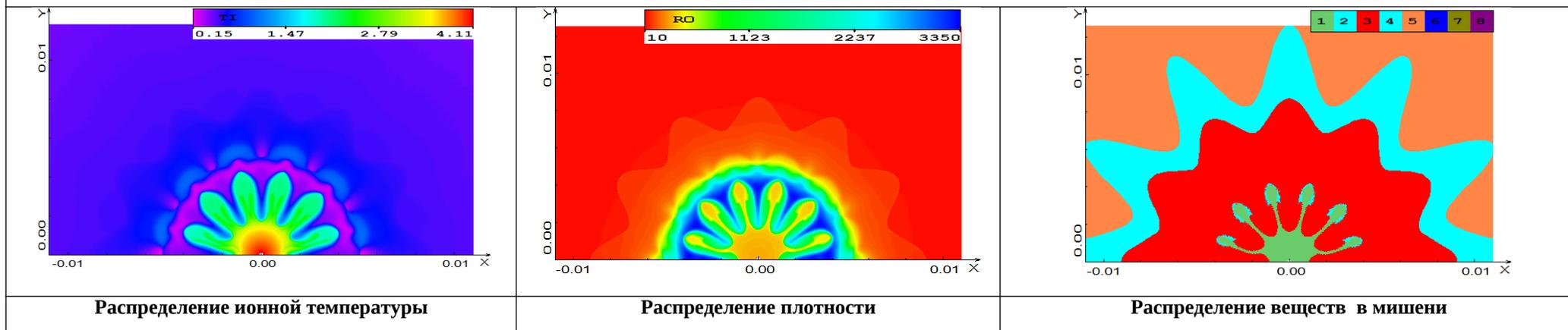


Рисунок 5 — Распределения температур ионов, плотности, кинетической энергии турбулентности и веществ в расчетах ТИГР -ЗТ на момент максимальной ионной температуры DT ($t_{Ti \max}=9,54$ нс). Результаты 2D-расчета с учетом турбулентного перемешиванием для варианта 7 из таблиц 3, 4 с заданием начального возмущения в виде 60-ой гармоники с амплитудой $\delta_0 = 10^{-6}$ см в распределении поглощенной энергии лазерного излучения по азимутальному углу.

ТИГР-3Т на момент максимального сжатия DT ($t_{pmax}=9,94$)



ОМЕГА-3Т на момент максимальной температуры ионов DT ($t_{TI}=9,89$)

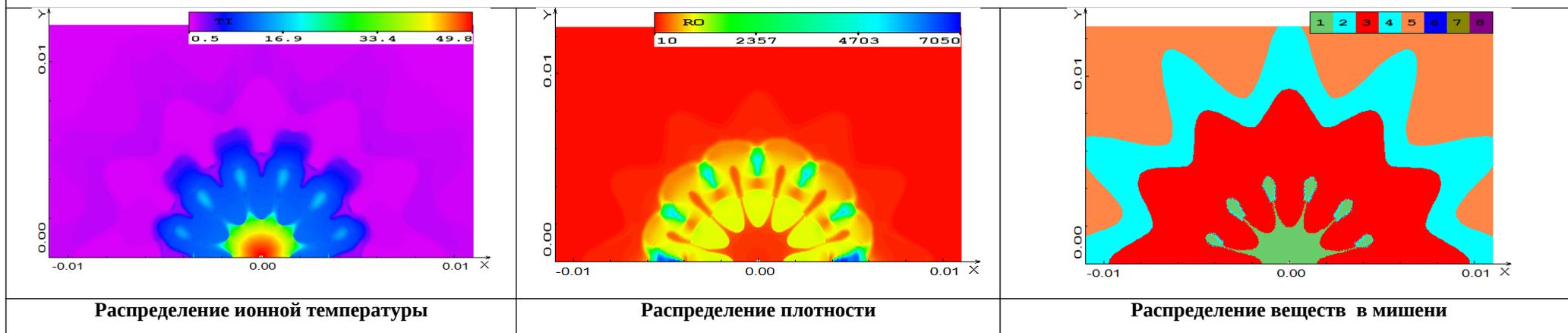


Рисунок 6 — Распределения температур ионов, плотности и веществ в расчетах ТИГР-3Т и ОМЕГА-3Т для 12-ой гармоники возмущений с амплитудой $A_{12} = 1,0$ % в распределении поглощенной энергии лазерного излучения по азимутальному углу