

На правах рукописи

ЯХИН РАФАЭЛЬ АСХАТОВИЧ

**ИССЛЕДОВАНИЕ ГИДРОДИНАМИЧЕСКОЙ НЕУСТОЙЧИВОСТИ И
ТУРБУЛЕНТНОГО ПЕРЕМЕШИВАНИЯ В ЗАДАЧАХ ЛАЗЕРНОГО
ТЕРМОЯДЕРНОГО СИНТЕЗА**

01.04.21 – Лазерная физика

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Автор:

Москва 2009

Работа выполнена в Национальном исследовательском ядерном университете "МИФИ" и Учреждении Российской академии наук Физическом институте им. П.Н. Лебедева РАН

Научный руководитель: доктор физико-математических наук,
профессор Розанов Владислав Борисович

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук,
ведущий научный сотрудник Бельков Сергей Аркадьевич

доктор физико-математических наук,
профессор Лебо Иван Германович

Ведущая организация: Институт Математического Моделирования РАН,
Москва

Защита состоится 30 сентября 2009 года в 15 час 00 мин. на заседании диссертационного совета Д 212.130.05 в аудитории К-608 Национального исследовательского ядерного университета "МИФИ" по адресу: 115409, г. Москва, Каширское шоссе, дом 31, тел. (495)324-87-66.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке НИЯУ МИФИ.

Автореферат разослан «30» августа 2009 года.

Просим принять участие в работе совета или прислать отзыв в одном экземпляре, заверенный печатью организации.

Ученый секретарь диссертационного совета



Евсеев И.В.

Общая характеристика работы

Актуальность работы.

В последние годы в связи с серьезными достижениями в решении проблемы лазерного термоядерного синтеза [1,2,3] приобретает все большую практическую значимость вопрос о влиянии неустойчивости, возникающей при ускоренном движении границ сжимающихся оболочек, на характеристики мишени.

В основе подхода лежит концепция сверхвысокого сжатия и нагрева термоядерных мишеней мощными лазерными импульсами. Независимо от выбранного типа мишени для достижения условий термоядерного зажигания необходимо сжимать горючее до огромных плотностей масштаба 100-2000 г/см³. Однако в процессе облучения и сжатия развиваются гидродинамические неустойчивости, препятствующие достижению оптимальных параметров термоядерного горючего. Например, в современных экспериментах, различие в наблюдаемом выходе нейтронов от предсказаний одномерных расчетов, не учитывающих влияние несимметрии, превышает два порядка при объемных сжатиях горючего более 10⁴ раз [4,5]. Поэтому, на сегодняшний день, проблема устойчивого сжатия мишеней является одной из ключевых в лазерном термоядерном синтезе (ЛТС), а решением вопросов, связанных с гидродинамическими неустойчивостями, из которых основную роль играют неустойчивости Рэлея-Тейлора и Рихтмайера-Мешкова занимаются ведущие лазерные лаборатории мира.

На сегодняшний день не существует сравнительно простой теоретической модели для описания процессов турбулентного перемешивания, включающей зависимость от начальных условий. Следует отметить, что при общем вполне оправданном, стремлении к осуществлению высокосимметричного сжатия капсул ЛТС, представляется интересным исследование сжатия при сильных отклонениях от симметрии, т.к. стадия коллапса практически всегда оказывается несимметричной. Серьезная работа проводится по изучению развития крупномасштабного гидродинамического перемешивания и его влияния на нейтронный выход реакции [6-10].

Большое внимание, в том числе в связи со сложностью технического эксперимента и его дороговизной, уделяется численному моделированию процессов, происходящих в мишенях в процессе сжатия и горения, его сопоставлению с экспериментом и предсказаниями теоретических работ [6, 11 - 17].

При этом ряд вопросов остается мало изученным. Одним из них является вопрос о влиянии мелкомасштабных возмущений формы оболочки на параметры сжатия, такие как температура, плотность термоядерного горючего и нейтронный выход.

Цели и задачи диссертационной работы.

Целями диссертационной работы являются:

1) анализ процессов развития гидродинамических неустойчивостей и турбулентного перемешивания на границе раздела разноплотных сред;

2) исследование процессов сжатия и горения мишеней для лазерных установок "Искра V" [18] и HiPER [19-21].

В соответствии с поставленными целями в диссертации решаются **следующие задачи:**

- 1) построить теоретическую модель описания ширины зоны перемешивания для широкого набора экспериментов с принципиально различными начальными условиями;
- 2) разработать методику проведения численных расчетов для описания процессов, происходящих в лазерных мишенях. На её основании провести расчеты моделирования экспериментов лазерного термоядерного синтеза и изучить влияние несимметрии на результат сжатия и горения мишеней;
- 3) проанализировать результаты эксперимента по прямому сжатию лазерных термоядерных мишеней на установке "Искра V";
- 4) для лазерной установки "Искра V" представить более эффективные мишени для дальнейших экспериментов, обеспечивающие более симметричное сжатие и высокий нейтронный выход;
- 5) провести расчеты сжатия и горения мишеней для будущей лазерной установки HiPER.

Научная новизна результатов, полученных в диссертации, состоит в следующем:

- 1) предложена теоретическая модель, включающая информацию о начальных условиях и позволяющая описать зону перемешивания в широком диапазоне начальных условий;
- 2) определена слабая зависимость развития зоны перемешивания от вклада высокочастотных гармоник;
- 3) проведен анализ влияния начальных возмущений формы поверхности капсулы термоядерного синтеза на результаты сжатия, такие как нейтронный выход, средняя и максимальная плотность и температура горючего, время сжатия, минимальный радиус оболочки;
- 4) для систем, обладающих осевой симметрией, предложена методика проведения численных расчетов несимметричного по полярному углу сжатия и горения мишеней лазерного термоядерного синтеза; впервые дано объяснение наблюдаемого в эксперименте низкого (в 100-1000 раз) по сравнению с данными одномерных расчетов нейтронного выхода.

Практическая ценность результатов диссертационной работы:

- 1) представленная модель позволяет быстро и с хорошей точностью проводить исследования процессов в лазерных термоядерных мишенях;
- 2) проведен анализ экспериментов на установке "Искра V";
- 3) для планируемых экспериментов на установке HiPER проведены расчеты сжатия и горения, основанные на картах и гистограммах освещенности мишени в зависимости от числа лазерных пучков;

4) предложены перспективные мишени для возможных экспериментов на установке "Искра V", обладающие большей степенью симметрии при сжатии и позволяющие достигать большой нейтронный выход.

На защиту выносятся следующие положения:

- 1) предложенная теоретическая модель, которая описывает ширину зоны перемешивания в широком диапазоне начальных условий;
- 2) методика описания процессов несимметричного по полярному углу сжатия и горения мишеней лазерного термоядерного синтеза, позволяющая быстро и с хорошей точностью описывать процессы в лазерных термоядерных мишенях;
- 3) слабое влияние высокочастотных гармоник на развитие области перемешивания и снижение нейтронного выхода при сжатии мишеней лазерного термоядерного синтеза;
- 4) для условий лазерной установки "Искра V" предложенные мишени, имеющие более высокую степень симметрии сжатия и позволяющие достигать большой нейтронный выход по сравнению с экспериментальными.

Апробация результатов исследования.

Основные результаты диссертационной работы опубликованы в четырнадцати работах и доложены на следующих научных конференциях и семинарах:

1. Змитренко Н.В., Розанов В.Б., Степанов Р.В., Яхин Р.А. "Моделирование перемешивания и роль несимметрии облучения при сжатии лазерных термоядерных мишеней". XXXVI Международная (Звенигородская) конференция по физике плазмы и управляемому термоядерному синтезу, (г. Звенигород, 9-13 февраля 2009 г.).
2. The fifth International Conference on Inertial Fusion Sciences and Applications (IFSA2007). V. Rozanov, R. Yakhin, N. Zmitrenko et al. "Analysis of the Conditions of Experiments on the Compression of Capsules With a Foam Absorber at Iskra V Facility". Journal of Physics: Conference Series 112 (2008) 022006.
3. The fifth International Conference on Inertial Fusion Sciences and Applications (IFSA2007). V. Rozanov, R. Yakhin, N. Zmitrenko et al. "The model of turbulent mixing zone evolution, which accounts for the deviation from spherical symmetry of laser thermonuclear target compression". Journal of Physics: Conference Series 112 (2008) 022011.
4. Яхин Р.А., Розанов В.Б., Степанов Р.В., Змитренко Н.В. "Анализ влияния несимметрии облучения в экспериментах по сжатию капсул на лазерной установке "ИСКРА-5". Сборник трудов научной сессии МИФИ 2009, в печати.
5. Gus'kov S.Yu., Demchenko N.N., Doskoch I.Ya., Rozanov V.B., Stepanov R.V., Tishkin V.F., Vergunova G.A., Yakhin R.A., Zmitrenko N.V. "Mathematical modeling of the fast ignition laser targets and the HiPER project". XXIV International Conference on Interaction of Intense Energy Fluxes with Matter. March 1-6, 2009, Elbrus, Kabardino-Balkaria, Russia.

6. Гуськов С.Ю., Демченко Н.Н., Доскоч И.Я., Змитренко Н.В., Розанов В.Б., Степанов Р.В., Тишкин В.Ф., Яхин Р.А., “Математическое моделирование сжатия лазерных мишеней для энергии лазера 1-2~кДж”. XXIII Международная конференция “Уравнения состояния вещества”. 1-6 марта 2008 г., Кабардино-Балкарская республика, Россия.
7. V.V. Rozanov, R. Yakhin, N. Zmitrenko et al. “Compression and Thermonuclear Yield of Laser Targets under Conditions of HiPER Facility with due to Regards for Irradiation Asymmetry”. Proc. of the XXX ECLIM, Darmshtadt, 2008, be in print.
8. V.V. Rozanov, R. Yakhin, N. Zmitrenko et al. “The mixing zone growth laws based on the evolution theory and evolution of neutron yield decreasing”. Proc. of the XXX ECLIM, Darmshtadt, 2008, be in print.
9. Аристова Е.Н., Розанов В.Б., Змитренко Н.В., Яхин Р.А., Баришпольцев Д.В., Лимпоух И. “Перенос энергии в малоплотных пористых средах легированных тяжёлыми элементами: анализ и моделирование экспериментальных результатов, полученных на установке PALS”. XXXV Международная (Звенигородская) конференция по физике плазмы и управляемому термоядерному синтезу, (г. Звенигород, 11-15 февраля 2008 г.).
10. Яхин Р.А., Розанов В.Б., Змитренко Н.В., Прончева Н.Г. “Модель перемешивания оболочек термоядерной лазерной мишени при сферическом сжатии”. XXXIV Международная (Звенигородская) конференция по физике плазмы и управляемому термоядерному синтезу, (г. Звенигород, 12-16 февраля 2007 г.).
11. I. Doskoch, N. Proncheva, V. Rozanov, R. Stepanov, R. Yakhin , N. Zmitrenko. “The Evolution Model of Mixing Zone Growth in the Case of a Spherical Shell Compression”. The 10th IWPCTM, Paris, France 17-21 July 2006. Proceedings, pp. 337-342.

Личный вклад соискателя отражен в разработке модели развития зоны перемешивания, отладке и реализации необходимых численных расчетов, анализе полученных результатов.

Структура и объем диссертации.

Диссертация состоит из введения, четырех глав и заключения. Работа содержит 135 страниц машинописного текста, 42 рисунка, 14 таблиц. Список литературы включает 105 наименований.

Содержание работы.

Во введении обосновывается актуальность работы, формулируются цели и задачи исследования, представляются основные положения, выносимые на защиту, их новизна.

В главе 1 диссертации проведен обзор публикаций, посвященный проблеме развития гидродинамических неустойчивостей на границе двух раноплотных сред. Перечислены основные современные результаты и тенденции в области лазерного инерциального синтеза.

Анализ показал, что несмотря на достаточное количество работ по исследованию перемешивания на границе двух взаимодействующих веществ

[22-34], на данный момент не существует моделей, достаточно точно предсказывающих результаты в зависимости от начальных условий и при этом достаточно простых и удобных в применении. Нынешние модели либо дают лишь качественную картину перемешивания, либо очень сложны в использовании. К тому же, большинство моделей позволяют описать лишь позднюю развитую степень перемешивания, которая не успевает наступить при сжатии лазерных мишеней.

В главе 2 представлены двумерные расчеты перемешивания двух газов разной плотности (постановка соответствовала экспериментам С.Зайцева на ударных трубах [35]), изучались процессы развития гидродинамических неустойчивостей Рэля-Тейлора (РТ) и Рихтмайера-Мешкова (РМ).

Проводилось исследование влияния разнообразных начальных условий на развитие турбулентного перемешивания; для плоской геометрии была проведена серия 2D расчетов развития неустойчивостей РТ и РМ при различных условиях по амплитуде и спектру мод начальных возмущений, числам Атвуда. Моделировалась переходная и нелинейная стадии развития гидродинамической неустойчивости. Для однотипных возмущений проведены расчеты при различном случайном выборе фаз возмущений. Геометрия задач – 2D и 3D (около 10%). Результатами расчетов явились поля плотности, компонент скорости, кинетической энергии, энтрофии, размеры зоны перемешивания, масса перемешанного вещества. Большинство расчетов были проведены по численному коду NUT [12] и MAX [14].

В расчетах рассматривалась следующая плоская задача, соответствующая реальным экспериментам, - в двумерной области $\{x_1 \leq x \leq x_2, z_1 \leq z \leq z_2\}$ с размерами $x_2 - x_1 = 72$ мм и $z_2 - z_1 = 150$ мм, $z_1 = -100$ мм, $z_2 = 50$ мм. В начальный момент времени задавались постоянная по пространству температура и соответствующие равновесные распределения плотностей и давления двух газов, находящихся в поле постоянной внешней силы (рис.1).

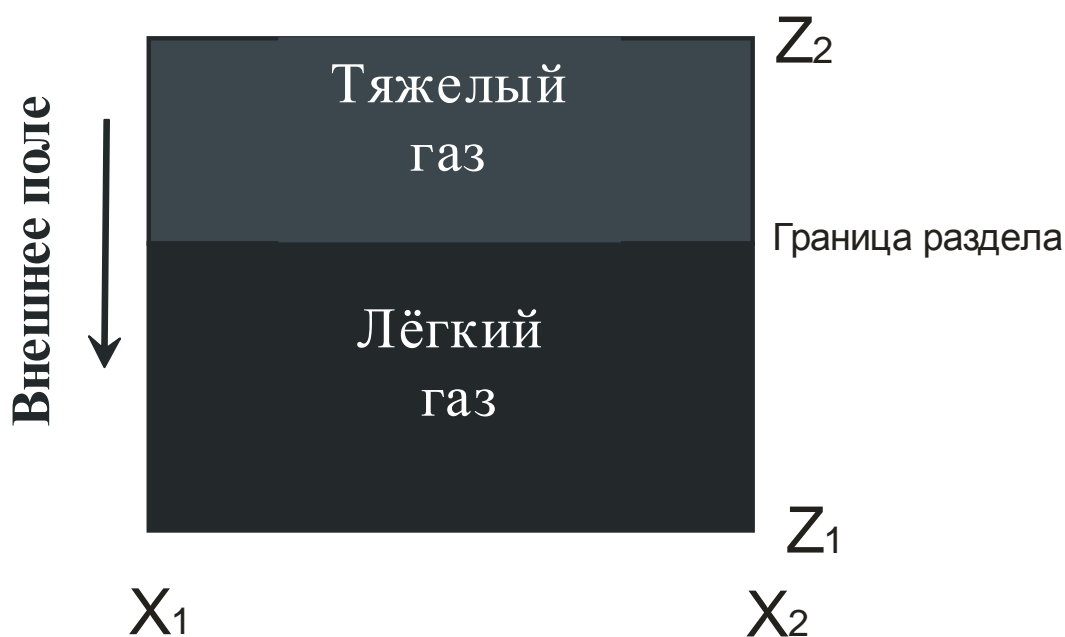


Рис.1. Геометрия задачи.

В отсутствие возмущений поверхность раздела газов имела координату $z=0$, выше нее, в области $0 \leq z \leq z_2$ располагался тяжелый газ, ниже, в области $z_1 \leq z \leq 0$ - легкий. Ускорение внешней силы $g = 10^4 \cdot g_o = 9.8 \cdot 10^{-5} \text{ мм/мкс}^2$ ($g_o = 9.8 \text{ м/с}^2$ - ускорение свободного падения) было направлено вниз.

Для описания термодинамических свойств газов применялось уравнение состояния идеального газа в виде:

$$p = \frac{R}{\mu} \rho T, \quad \varepsilon = \frac{1}{\gamma - 1} \frac{R}{\mu} T,$$

γ - показатель Пуассона, который для всех газов принимался равным $\gamma = \frac{5}{3}$; R - универсальная газовая постоянная; μ - молярная масса газа (для ксенона - $\mu = 131$, гелия - $\mu = 4$, аргона - $\mu = 40$).

В состоянии гидростатического равновесия плотность и давление изотермического газа имели экспоненциальное распределение:

$$p_i(z) = p_o \exp\left(-\frac{m_i g z}{k T_o}\right),$$

$$\rho_i = \rho_{oi} \exp\left(-\frac{m_i g z}{k T_o}\right),$$

где индексы $i=1, 2$ означали соответственно легкий и тяжёлый газ, ρ_{oi} и p_o - плотности и давление газов на поверхности раздела, m_i - масса молекулы газа, $T_o = 300 \text{ }^\circ\text{K}$ (температура газов выбрана соответственно условиям эксперимента на ударных трубах), k - постоянная Больцмана. Для двух выбранных пар газов Хе-Ар и Хе-Не на контактной границе: $p_o = 0.5 \text{ атм}$, $\rho_{o1} = 8.07 \cdot 10^{-4} \text{ г/см}^3$ (аргон), $\rho_{o1} = 8.07 \cdot 10^{-5} \text{ г/см}^3$ (гелий), $\rho_{o2} = 2.63 \cdot 10^{-3} \text{ г/см}^3$ (ксенон).

В приведенных исследованиях возмущения задавались в соответствии со следующей формулой для формы контактной поверхности:

$$z(x) = - \sum_{i=1}^n a_{oi} \cos(k_i x + \varphi_i). \quad (1)$$

Здесь i пробегает 6, 8 или 10 значений по числу генерируемых мод возмущений, $k_i = 2\pi/\lambda_i$ - волновое число гармоники с длиной волны λ_i , a_{oi} - начальная амплитуда отдельного возмущения. Фазы $\varphi_i = 2\pi/8 \cdot m_i$, где целое число m_i из диапазона $0 \leq m_i \leq 7$, выбирались случайным образом. Длины волн выбирались из условия отсутствия в наборе гармоник кратных значений, для чего было принято следующее определение:

$$\lambda_i = (x_2 - x_1) / n_i \quad (2)$$

где n_i - i -тое простое целое число ($n_i = 2, 3, \dots, 29$), $x_2 - x_1 = 72 \text{ мм}$. Тем самым, диапазон значений длин волн определялся как $2.531 \leq \lambda_i \leq 36 \text{ мм}$.

Рассматривались две принципиально различные задачи. В первом случае изучался процесс перемешивания вследствие развития неустойчивости Рэлея-Тейлора, вызванного внешней постоянной силой. Во втором случае изучалась эволюция неустойчивости Рихтмайера-Мешкова. Для этого в начальный момент через вещество из легкого газа в тяжелый и наоборот вдоль оси z проходила ударная волна с числом Маха 2.5-4.5. В качестве примера на рисунке 2 представлен пример расчета развития неустойчивости Рэлея-Тейлора.

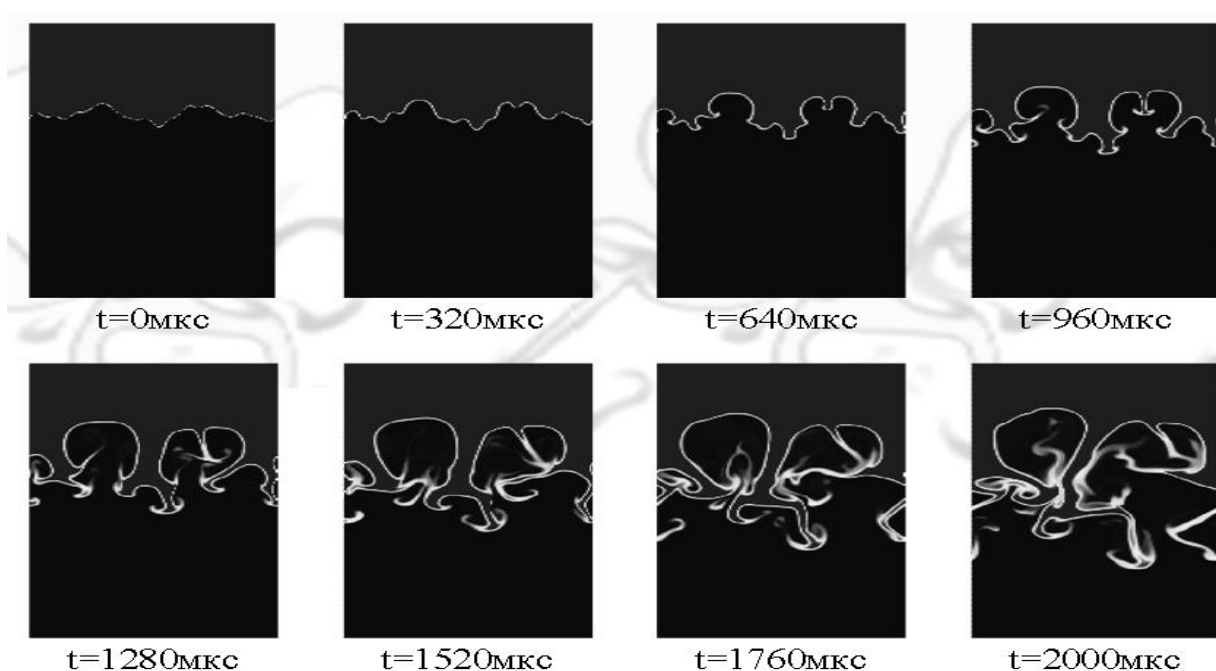


Рис.2. Эволюция неустойчивости Рэля-Тейлора. Поле плотности (представлено положение границы между тяжёлым и лёгким газом) – результат расчета для пары He-Xe (плоский случай, число гармоник возмущения $n=6$).

На основе численных расчетов была создана обширная база данных по развитию неустойчивости и перемешивания двух газов в плоской геометрии при постоянном ускорении для режимов, отличающихся типом неустойчивости (РТ и РМ), числом Атвуда (0.941 и 0.532), различным числом учитываемых мод и, соответственно, максимальным номером наиболее коротковолновой моды ($n_6=13$, $n_8=19$ или $n_{10}=29$), различными начальными амплитудами a_{0i} и их зависимостью от номера моды ($a_{0i} = \text{const}/k$ и $a_{0i} = \text{const}$);

- ширина зоны перемешивания существенно зависела от амплитуды начальных возмущений и изменялась со временем по закону близкому к линейному;
- выявлена слабая зависимость ширины зоны перемешивания от вклада высоких мод;
- с уменьшением перепада плотности на контактной границе развитие зоны перемешивания происходило более медленно;
- на нелинейной стадии скорость роста пузыря легкого газа практически останавливался, ширина зоны росла за счет проникновения струй тяжелого газа;
- развитие возмущений при прохождении ударной волны из газа большей плотности в газ меньшей плотности имело тот же характер, что и наблюдаемый в случае прохождения ударной волны из легкого газа в тяжелый;
- было определено, что возмущения развиваются независимо лишь до некоторого момента – нелинейной стадии, а затем происходило некоторое замедление роста;
- двумерные возмущения с одинаковым волновым числом разрушались значительно быстрее, нежели трехмерные.

В главе 3 на основании анализа проведенных численных расчетов и существующих теоретических моделей описания турбулентного слоя в

процессе перемешивания двух разноплотных веществ была разработана теоретическая модель для описания ширины и скорости роста зоны турбулентного перемешивания для широкого диапазона плотностей и ускорений, учитывающая влияние начальных условий. Следует иметь в виду, что значения плотностей и ускорений в экспериментах на ударной трубе и мишенях лазерного сжатия отличаются на много порядков: плотности 10^{-3} г/см³ и 10^3 г/см³, ускорения 10^7 см/с² и 10^{15} см/с² соответственно. Поэтому предложенная нами модель будет опираться на фундаментальные свойства газодинамического подобия.

Исходя из соображений правильных асимптотик в начале процесса и на более поздней стадии, можно сделать ряд заключений. Как следует из эволюционной модели развития неустойчивостей [23] и проведенных расчетов, в начале процесса при наличии высоких мод зона перемешивания увеличивается со временем по квадратичному закону. На поздней стадии скорость роста зоны стремится к постоянной предельной величине, которая определяется скоростью всплывания пузыря (шара) газа. Размер пузыря определяется низшей гармоникой возмущения, получившей к данному моменту времени наибольшее развитие.

Основные положения теории основываются на анализе многочисленных данных натуральных и компьютерных экспериментов, к тому же она применима как для неустойчивости РТ, так и для неустойчивости РМ, так как использует только общие свойства этих неустойчивостей.

Под шириной зоны перемешивания понимается величина взаимного проникновения легкого и тяжелого газов. Для плоского случая, начальная постановка которого представлена в главе 2, $L = \max z(x) - \min z(x)$.

Для набора гармоник начальная ширина определяется суммой вкладов от каждой присутствующей гармоники:

$$L(0) = \sum_i a_{0i} w_i(0), \quad (3)$$

где $w_i(0)$ - весовой коэффициент, определяющий вклад данной гармоники. В начальный момент $w_i(0)$ определяется случайной начальной фазой данного возмущения:

$$w_i(0) = \cos(k_i x_{\max} + \varphi_i) - \cos(k_i x_{\min} + \varphi_i) \quad (4)$$

и, в частности, может быть $w_i(0) = 2$ в случае развития одной единственной моды. Здесь x_{\max} и x_{\min} определяют положение максимума и минимума контактной границы соответственно, а φ_i - фазу. Из последнего соотношения видно, что ширина зоны определяется по максимально "высокому" положению легкой жидкости и минимально «низкому» положению тяжелой жидкости.

Ширину зоны перемешивания в произвольный момент времени t можно представить в виде:

$$L(\Delta t) = \sum_i L_i(\Delta t) w_i(\Delta t) \quad (5)$$

Гармоника с номером "i" увеличивает зону перемешивания за интервал времени $\Delta t = t - t_0$ на величину:

$$L_i(\Delta t) = 2a_{0i} + \frac{\lambda_i}{2\alpha_i^{eff}} \left(\sqrt{1 + \frac{(\alpha_i^{eff} \int_{t_0}^t \gamma_i dt)^2}{2\pi}} - 1 \right) \quad (6)$$

Здесь $\gamma_i^2 = \frac{2\pi}{\lambda_i} gA$, $A = \frac{\rho_2 - \rho_1}{\rho_2 + \rho_1}$, $\alpha_{0i} = \frac{2\pi}{\lambda_i} a_{0i}$, $\alpha_i^* = \alpha_{0i} e^{\gamma_i t/2}$, $\alpha_i^{eff} = \frac{\alpha_{0i} \alpha_i^*}{\alpha_{0i} + \alpha_i^*}$.

Очевидно, что на начальной стадии перемешивания в таком определении зоны перемешивания ширина этой зоны определяется амплитудой линейно развивающейся не разрушившейся гармоники. При малых t и постоянных γ имеем: $\frac{dL_i}{dt} \sim \frac{\alpha_i^{eff} \lambda \gamma_i^2 t}{4\pi}$; $L_i \sim t^2$. При больших t : $\frac{dL_i}{dt} = \frac{\sqrt{A}}{2} \sqrt{g\lambda_i} = \nu \sqrt{g\lambda_i}$. Здесь ν – константа, зависящая от типа взаимодействующих веществ. В модели Лэйзера [27] для числа Атвуда $A=1$ $\nu=0.36$ определяет скорость всплывания пузыря лёгкого газа в цилиндрической трубе: $V_{lim} = 0.36 \sqrt{g\lambda_i}$. В предложенной формуле для $\frac{dL_i}{dt} = \nu \sqrt{g\lambda_i}$ коэффициент $\nu=0.36 \div 0.49$ учитывает значения A на границе раздела, скорость всплывания легкого пузыря и более высокую скорость падения тяжелой струи.

Ширина зоны перемешивания определяется вкладом всех гармоник, однако их вклад различен и меняется со временем. В данный момент времени длинноволновые возмущения могут давать вклад $\approx 2a_i$, при этом коротковолновые возмущения будут играть меньшую роль.

Со временем весовой вклад каждой моды уменьшается, что соответствует её разрушению за счет развития неустойчивости Кельвина-Гельмгольца. Поведение $w_i(\Delta t)$ можно приближенно представить зависимостью:

$$w_i(\Delta t) \sim w_i(0) e^{-\int_0^t (\gamma_{KH})_i dt} \sim e^{-\frac{1}{4} k_i a_i (\int_0^t \gamma_i dt)^2 \sqrt{1-A^2}}$$

Здесь:

$$(\gamma_{KH})_i = k_i v_i \frac{\sqrt{\rho_1 \rho_2}}{\rho_1 + \rho_2}, \quad v_i t = \frac{a_i}{2} \left[\gamma_i t + e^{-\gamma_i t} - 1 \right] \cong a_i \left[1 + \frac{(\int_0^t \gamma_i dt)^2}{2} \right],$$

здесь v_i – скорость сдвигового течения, вызванного неустойчивостью РТ или РМ, для гармоники с номером i .

Величины $(\gamma_{KH})_i$ и γ_i зависят от волнового вектора $k_i = \frac{2\pi}{\lambda_i}$ и, тем самым, зависят от номера гармоники. На поздних стадиях вклад высоких гармоник не равен нулю, и его желательно учесть. Можно предположить, что вклад гармоники после её разрушения в ширину зоны будет порядка длины волны. Исходя из результатов расчетов, была предложена следующая формула для веса “ i ”-ой гармоники:

$$w_i(t) = w_i(0) \left[\frac{0.9}{i^2} + \frac{1 - 0.9/i^2}{\exp(0.3k_i a_{0i} \sqrt{1 - A^2} (\int_0^t \gamma_i dt)^2)} \right] \quad (7)$$

На рисунке 3а представлен общий вид эволюции неустойчивости Рэлея-Тейлора, а на рисунке 3б – разрушение неустойчивости РТ: представлены форма возмущения, длина волны неустойчивости Кельвина-Гельмгольца $\lambda = BS$, её амплитуда $\zeta = HG$, $d = OF$ – толщина струи.

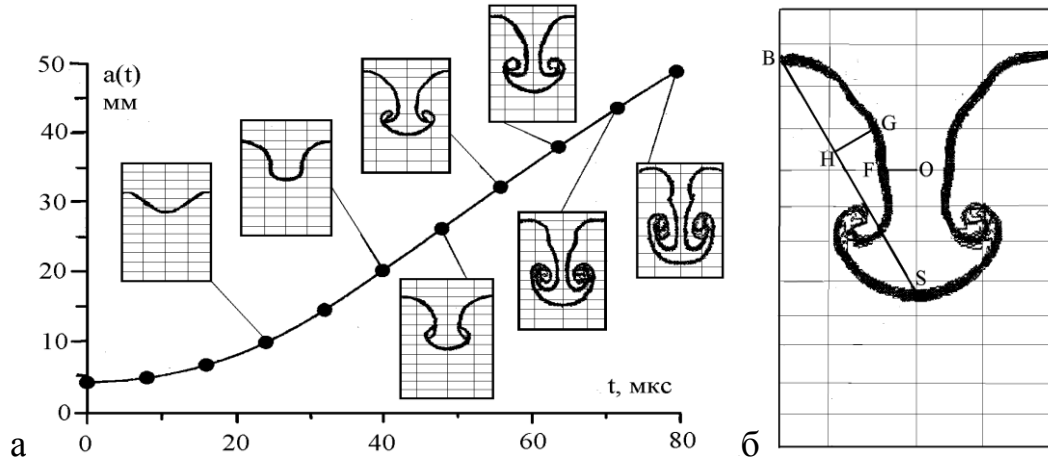


Рис.3.(а) Общий вид эволюции неустойчивости Рэлея-Тейлора. (б) Схематическое изображение формы возмущения неустойчивости Рэлея-Тейлора.

На стадии перемешивания высокочастотные моды дают вклад в ширину зоны перемешивания: для 2D геометрии масштаб вклада $(3 \div 5)\lambda_i/2\pi$, для 3D геометрии $(10 \div 20)\lambda_i/2\pi$, эти результаты вытекают из анализа выражения (6). Более важный вывод состоит в том, что основной вклад в ширину зоны перемешивания дают длинноволновые возмущения, получившие развитие к данному моменту. Поскольку для этих возмущений величина $\int_0^t \gamma_i dt$ достигает меньших значений, их эволюцию проще рассчитать с помощью прямых численных расчётов или оценить, используя аналитические модели.

Приведено сравнение результатов предложенной модели с результатами численных расчетов и экспериментов.

В главе 4 исследована проблема влияния процессов перемешивания на результаты сжатия и горения мишеней ЛТС.

Ответ на вопрос о влиянии несимметрии облучения и сжатия на нейтронный выход реакции термоядерного синтеза может быть получен только путем сопоставления информации об отклонении от симметричного сжатия в связи с выбранными начальными условиями.

С целью изучения процессов перемешивания в задачах ЛТС была предложена методика, которая позволила сравнительно быстро и точно описывать процессы, происходящие при сжатии и горении лазерных мишеней. На её основании был проведен анализ и численные расчёты экспериментов по сжатию стеклянных капсул с DT газом в условиях малопучкового облучения на установке "Искра V" (12 пучков) на второй гармонике йодного лазера ($\lambda = 0.66$ мкм) для энергии лазерного импульса ~ 2 кДж при длительности ~ 0.5 нс при

сильной несимметрии облучения и сжатия, а также расчеты сжатия и горения мишеней для будущей Европейской лазерной установки HiPER.

Сферическая мишень предполагала существование ряда новых факторов, существенно осложняющих процесс моделирования развития зоны перемешивания, таких как, конечное время сжатия, сложный начальный спектр возмущений, содержащий низкие и высокие гармоники, не всегда точно известный, сложность самой мишени, существенная нелинейность динамики развития на поздней стадии (стадии коллапса) и т.д.

Была предложена следующая схема исследования сжатия и горения мишени. Сначала на основании экспериментальных данных об условиях облучения на данной установке строились карты и гистограммы освещенности, методика построения которых (а в случае абсорбера из пены – карт поглощенной энергии) представлена в работе [36]. После построения карт освещенности на них выбиралась серия "наиболее информативных разрезов", расположение "горячих" и "холодных" областей на них и характерные значения интенсивности, а для последних, по гистограммам, определялись площади на поверхности капсулы, засвеченные излучением с выбранным значением интенсивности. Непосредственным результатом анализа облучения мишени лазерными пучками было задание распределения (в пространстве и времени) поглощенной энергии. Такое распределение можно получить, проследив "судьбу" каждого из лучей лазерного пучка, т.н. "ray-tracing". В этом подходе подводимая энергия в численном методе представляется большим (~ 1000) количеством лазерных лучей, распространение которых в среде описывается уравнениями геометрической оптики с учетом поглощения в силу тех или иных механизмов. Однако такой подход не свободен от ряда недостатков, как физического, так и численного характера. В частности, трудно предложить удовлетворительную модель учета генерации и переноса быстрых электронов. В связи с этим нами использовался другой подход.

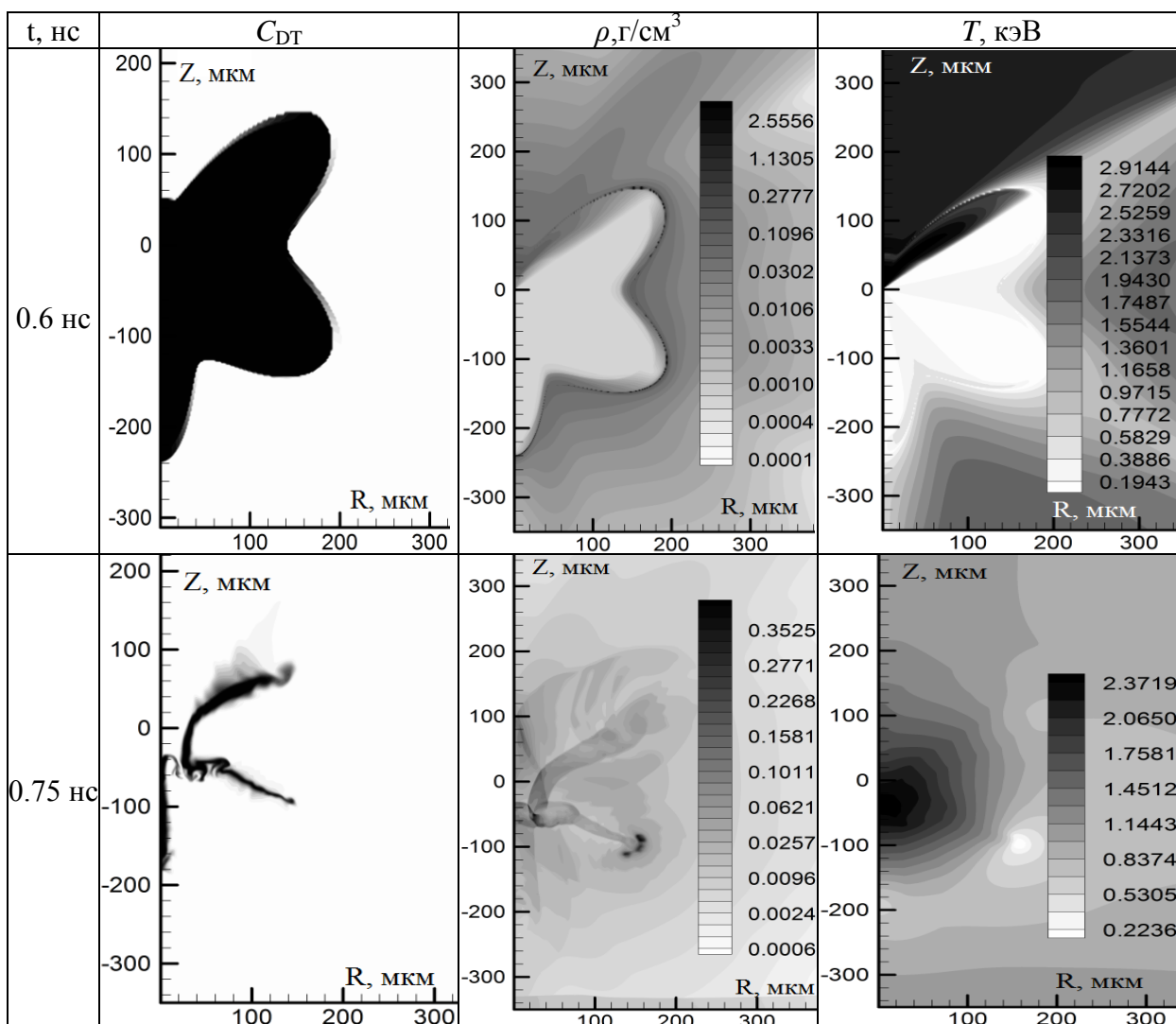
На основании карт освещенности проводились 1D расчеты, учитывающие широкий спектр физических эффектов, с рядом значений освещенности между максимумом и минимумом. Такие расчеты давали информацию о динамике процессов в тех участках мишени, где интенсивность облучения велика, и в тех, где она мала, а также позволяли получить картины 2D распределения поглощенной энергии (вместе с распределениями газодинамических и термодинамических величин). Каждый из этих 1D расчетов соответствовал тому или иному участку поверхности мишени на карте распределения освещенности (т.е. выполнялся для всей совокупности интенсивностей облучения, которая имеет место для данной системы "лазер-мишень").

Для построения 2D расчетов проводилось усреднение по азимутальному углу, оставляющее зависимости всех величин только от радиуса и полярного угла. Полученным картам освещенности мишени и 1D расчетам соответствовало несколько возможных вариантов 2D расчетов сжатия, определяемых из наиболее информативных разрезов. В качестве начальных данных для 2D расчета задавались значения плотности, давления, скорости в зависимости от значения полярного угла, полученные в 1D расчетах. Дополнительно проводилась процедура "сшивки" нескольких 1D расчетов.

Момент начала двумерного расчета выбирался близким к времени коллапса наиболее “быстрого” 1D расчета.

Для экспериментов на установке “Искра V” по прямому сжатию сферических мишеней использовались высокоаспектные сферические стеклянные капсулы диаметром 513-525 мкм с толщиной стенки 1.25-1.3 мкм, заполненные DT-смесью с давлением 3 атм. Напомним, что энергия излучения установки “Искра V” для 12 пучков составляла 2.5 кДж, распределение интенсивности по времени является гауссовым с длительностью на полувысоте ~ 0.5 нс. Распределение интенсивности в пятне – гауссовское, диаметр пятна на полувысоте – 160 мкм, фокусное расстояние – 1.6 м, выходной диаметр лазерного пучка – 0.29 м. Исходя из анализа карт и гистограмм освещенности, а также результатов 1D расчетов были проведены 2D расчеты сжатия мишеней, максимально приближенные к экспериментальным на установке “Искра V”.

На рисунке 4 представлены фрагменты результатов, иллюстрирующие динамику несимметричных вариантов сжатия. Для трех моментов времени построены поля концентрации DT топлива C_{DT} , плотности и температуры соответственно (момент $t=0.8$ нс примерно соответствует максимуму сжатия). Нейтронный выход в расчете составлял $8.01 \cdot 10^9$, что находится в хорошем согласии с экспериментом. Заметим, что в одномерных расчетах нейтронный выход составлял $10^{11}-10^{12}$.



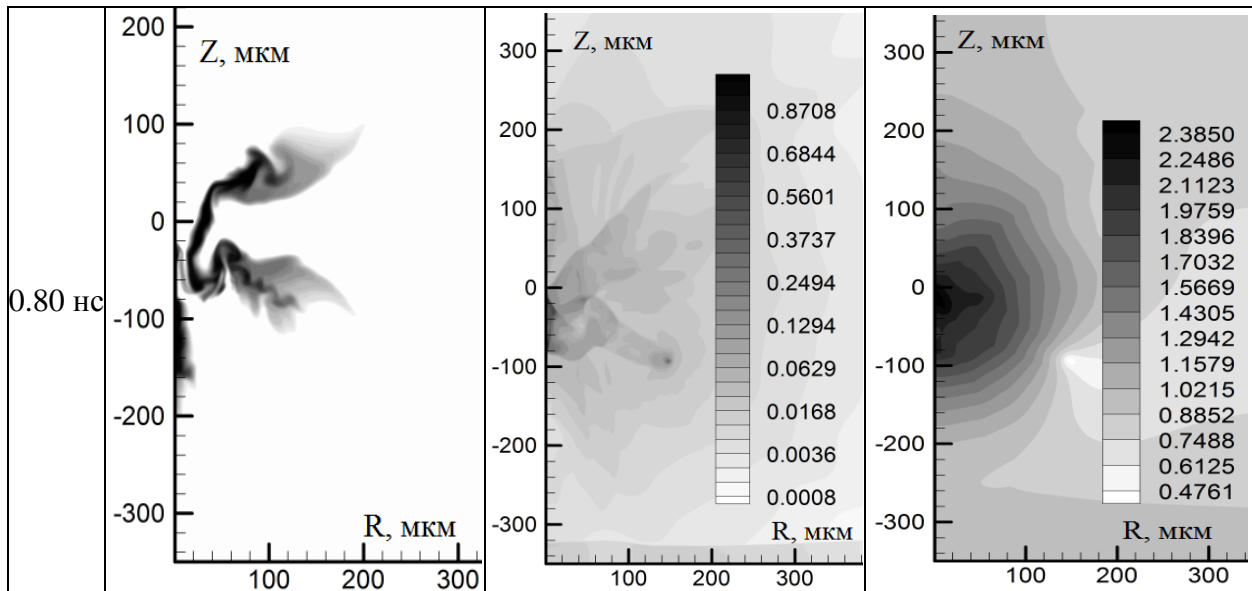


Рис. 4. Эволюция поля концентрации, плотности и температуры.

По данным 1D-расчетов выход нейтронов должен составить $\sim 5 \cdot 10^{11}$ для энергии лазера ~ 2 кДж. Экспериментальные результаты дают выход в 100-1000 раз меньший. Вследствие несимметричного облучения отдельные куски неиспаренной мишени подлетают к центру в разное время, вследствие чего снижаются температура, плотность горючего и области расположения горючего смещаются в разных направлениях от геометрического центра мишени, что хорошо видно на рисунке 4.

Таким образом, несимметрия облучения мишени стала причиной смещения горячей области горючего и значительного снижения нейтронного выхода, температуры и плотности.

В описанной постановке 2D-расчеты правильно предсказывают порядок наблюдаемого числа нейтронов, при этом неучтенные при 2D-моделировании эффекты, такие как генерация быстрых электронов, могут привести к дальнейшему снижению выхода.

Представленные данные свидетельствуют, что примененная методика позволяет воспроизводить основные экспериментальные результаты даже при столь несимметричном облучении, как на установке «Искра V».

Существует два возможных варианта оптимизации процесса сжатия – либо изменение размеров мишени либо перенастройка лазерной системы. Мы предположили, что легче изменить размер мишени, нежели менять геометрию облучения. Были представлены перспективные мишени с абсорбером из пены, обладающие лучшей симметрией сжатия и обеспечивающие больший нейтронный выход. Рассматриваемые конструкции представляли собой DT-газ, заключенный в сферическую оболочку. Мы рассматривали достаточно умеренные, с точки зрения степени сжатия, мишени: внешний и внутренний радиусы твёрдой оболочки из полиэтилена равны соответственно 140 и 150 мкм (аспектное отношение $C_R=14$). Начальная плотность DT-газа составляла $2.5 \cdot 10^3$ г/см³. Для конструкций типа «Лазерный Парник» эта оболочка с целью сглаживания неоднородностей облучения была дополнительно окружена пеной со средней плотностью 10 мг/см³ и толщиной 150 мкм. В соответствии с

теорией и экспериментальными данными, такая толщина пены соответствует полному и однородному поглощению в ней лазерного излучения. Внешний радиус «пенной мишени», в этом случае, составлял, тем самым, 300 мкм. Также стоит отметить, что при выборе мишени учитывалась необходимость согласования с длительностью и формой лазерного импульса, т.е. момент коллапса наступал немного позднее времени окончания лазерного импульса. На рис. 5 для данного расчёта представлены поля концентрации DT-топлива, плотности и температуры для 2-х моментов времени. Нейтронный выход для данного варианта составил $1.2 \cdot 10^{10}$.

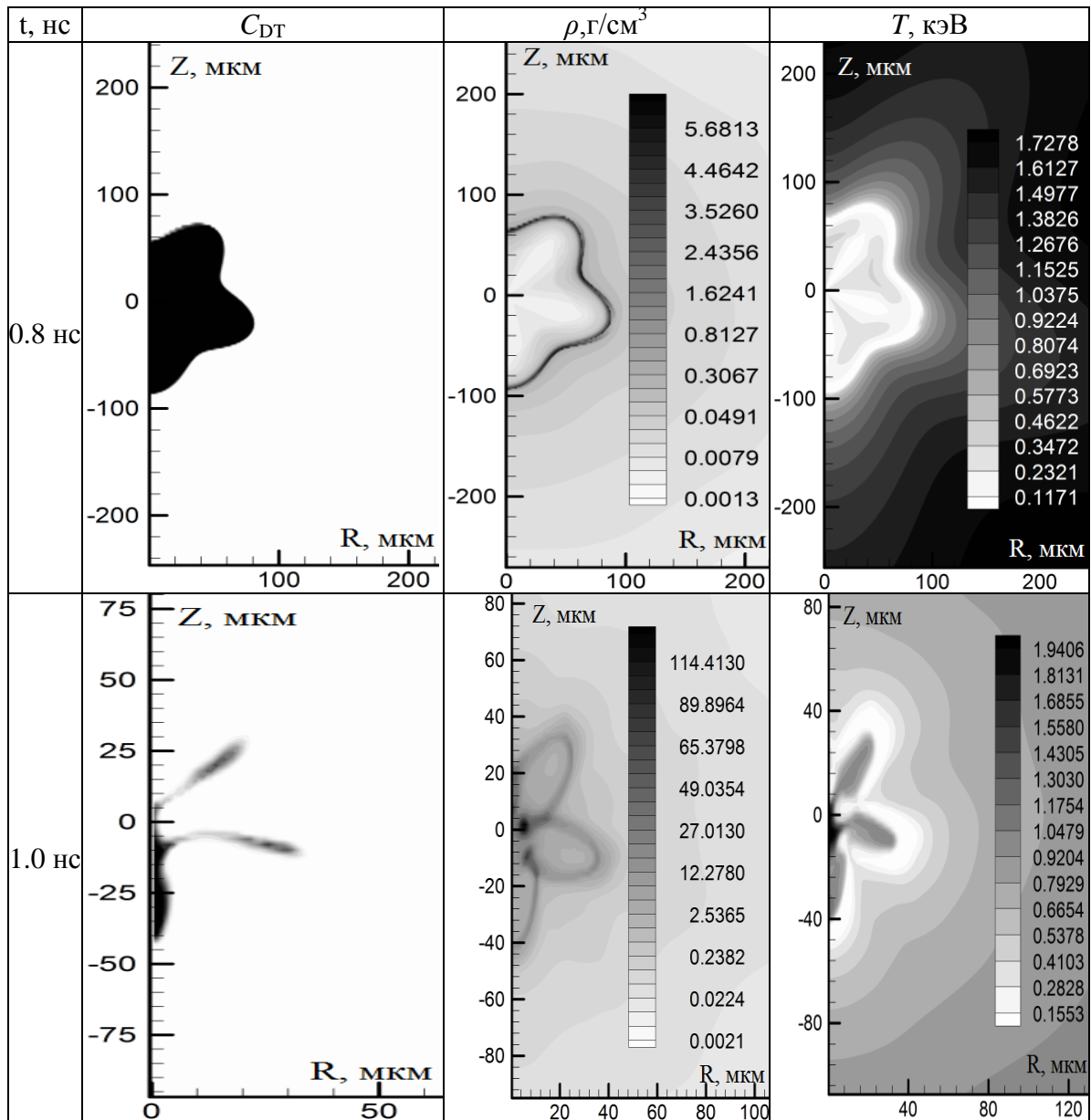


Рис. 5. Эволюция поля концентрации, плотности и температуры.

Далее согласно предложенной методике были представлены расчеты сжатия и горения мишеней для будущей установки «быстрого зажигания» HiPER. В ней используется подход, основанный на использовании двух синхронизированных по времени действия лазерных импульсов, один из которых за время, равное нескольким наносекундам, сначала сжимает мишень, а второй,

обладая длительностью в тысячу раз меньшей, чем первый, нагревает термоядерное вещество и инициирует в нем развитие реакции синтеза. Этот подход получил название "быстрое зажигание". Он наиболее экономичен с точки зрения необходимой лазерной энергии (которая в этом случае может быть в несколько раз меньше, чем при прямом сжатии одним лазерным импульсом), но более сложен технически, поскольку требует использование дополнительного лазерного импульса с короткой длительностью в несколько десятков пикосекунд и мишени специальной конструкции. Полная лазерная энергия в установке составит 200-400 кДж, при этом энергия импульса зажигания будет не более 100 кДж. Длина волны излучения составит 0.35 мкм (3-я гармоника неодимового лазера).

В известных на сегодняшний день схемах реакторов (HYLIFE, KOYO-F) для сжатия будет возможно использовать 2-32 лазерных пучка и, кроме того, часть направлений для облучения мишеней будет невозможно использовать из-за конструкторских особенностей реактора. В результате мишени будут освещаться меньшим числом пучков при возможном их несимметричном расположении на сфере.

На рисунке 6 приведен пример расчета несимметричного сжатия 8-ю лазерными пучками с общей энергией 132 кДж. Время на рисунке отсчитывается от начала лазерного импульса, длительность которого 10.9 нс. Число нейтронов составляло $\approx 5 \cdot 10^{16}$ ($G \approx 0.9$), что находится в хорошем согласии с результатами, представленными в других работах [19-21].

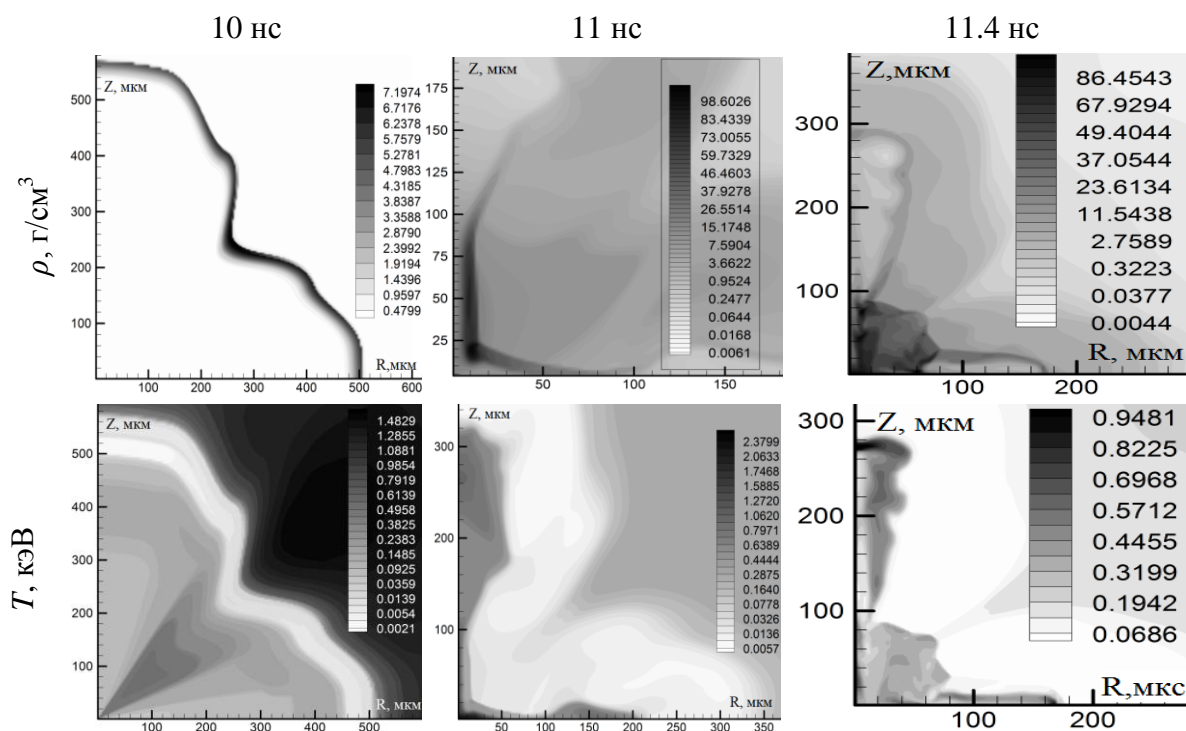


Рис.6. Расчет 8-ми пучкового сжатия DT - мишени HiPER. Поле плотности и температуры.

Проведенный анализ выявил ряд серьезных вопросов: главные из которых – сколько необходимо дополнительной лазерной энергии, чтобы компенсировать потери в нейтронном выходе, вызванные асимметрией облучения (1D расчеты

предсказывают $G \approx 100$); какой момент времени является наиболее эффективным для “быстрого зажигания”.

Во второй части главы 4 проведен анализ влияния начальных возмущений формы поверхности капсулы термоядерного синтеза на результаты сжатия, такие как нейтронный выход, средняя и максимальная плотность и температура горючего, время сжатия, минимальный радиус оболочки и т.д.

Начальные возмущения задавались на внутренней и внешней границах сжимающейся оболочки. Был проведен ряд расчетов, аналогичных расчетам, проведенным для условий ударной трубы, но только для параметров лазерного сферического сжатия. В качестве базовой для изучения выбиралась мишень для установки “Искра V”.

Для ширины зоны перемешивания с учетом результатов работы [37] было предложено следующее выражение:

$$L(\Delta t) = \sum_i L_i(\Delta t) w_i(\Delta t) + \sum_i \frac{a_{0i}}{2} (\exp(\gamma_R t) - 1),$$

здесь $\gamma_R = \frac{dR}{Rdt}$.

Данное выражение отличается от (5) тем, что к нему добавляется второе слагаемое. Оно позволяет учесть сферичность задачи, а именно влияние схождения вещества к центру на амплитуду развивающихся возмущений.

Было определено, что мелкомасштабные возмущения формы поверхности с начальной амплитудой в несколько микрон слабо влияют на процесс сжатия мишени. Снижение нейтронного выхода составило не более 2-3 раз по сравнению с симметричным сжатием. При этом нейтронный выход уменьшался при увеличении ширины зоны перемешивания.

В заключении сформулированы основные выводы работы.

Основные результаты работы.

В данной работе исследовались гидродинамические неустойчивости и турбулентное перемешивание с целью оптимизации сжатия и горения мишеней лазерного термоядерного синтеза.

Основные результаты данной работы сводятся к следующему:

- на основании рассмотрения развития неустойчивости в плоских и сферических расчётах, а также с учётом эволюционной модели развития неустойчивостей впервые были предложены аналитические выражения, которые описывают развитие зоны перемешивания с учётом начальных условий, включающих спектр, амплитуды возмущений и т.д.; важным преимуществом полученных выражений является возможность их дальнейшего использования для описания процессов перемешивания при весьма широком диапазоне физических параметров в расчетах, моделирующих принципиально различные режимы, т.к. в подобных газодинамических задачах выполняются фундаментальные свойства газодинамического подобия; результаты численных расчетов, их обработка, полученные зависимости позволили ответить на важный для проблемы ЛТС вопрос о зависимости характеристик перемешивания от начальных условий, таких как амплитуда, фаза возмущений, число гармоник возмущений;

- выявлена важная особенность: ширина зоны перемешивания слабо зависит от вклада высоких мод (при увеличении количества учитываемых «высоких» мод ширина зоны перемешивания несколько уменьшается);
- для решения проблемы предсказания термоядерного выхода с учетом несимметрии была предложена методика постановки расчетов для описания процессов, происходящих в лазерных мишенях. Данная методика позволяет сравнительно быстро, и с хорошей точностью моделировать реальные лазерные эксперименты;
- описанный в работе алгоритм был применён к анализу мишеней, экспериментально изученных на установке "Искра V" и HiPER. Проводилось сравнение с экспериментальными данными (установка "Искра V") и результатами численных расчетов, полученными в других лабораториях (проект HiPER). Обнаружено хорошее согласие результатов. Методика, основанная на анализе начальных условий, может в дальнейшем быть использована для исследований в области инерциального термоядерного синтеза;
- численные расчеты позволили ответить на важный вопрос о зависимости характеристик перемешивания при сжатии термоядерных мишеней от начальных условий. Была выявлена слабая зависимость нейтронного выхода от вклада высоких гармоник и случайного распределения фаз возмущений;
 - были предложены перспективные мишени меньшего размера, оптимизированные под уровень энергии установки "Искра V". Сравнились капсулы прямого сжатия и капсулы с абсорбером из пены - "лазерный парник". На основании расчетов однородности облучения и одномерных и двумерных расчетов сжатия и развития термоядерных реакций установлено, что капсулы с абсорбером из пены менее чувствительны к неоднородности облучения в условиях установки "Искра V" и именно их целесообразнее использовать в будущих экспериментах.

Список публикаций по теме диссертации.

1. Н.В. Змитренко, Н.Г. Прончева, В.Б. Розанов, Р.А. Яхин, "Модель перемешивания оболочек термоядерной лазерной мишени при сферическом сжатии". *Квант. электроника*, 2007, 37 (8), 784-791.
2. The fifth International Conference on Inertial Fusion Sciences and Applications (IFSA2007). V. Rozanov, R. Yakhin, N. Zmitrenko et al. "Analysis of the Conditions of Experiments on the Compression of Capsules With a Foam Absorber at Iskra V Facility". *Journal of Physics: Conference Series* 112 (2008) 022006.
3. The fifth International Conference on Inertial Fusion Sciences and Applications (IFSA2007). V. Rozanov, R. Yakhin, N. Zmitrenko et al. "The model of turbulent mixing zone evolution, which accounts for the deviation from spherical symmetry of laser thermonuclear target compression". *Journal of Physics: Conference Series* 112 (2008) 022011.
4. Яхин Р.А., Розанов В.Б., Степанов Р.В., Змитренко Н.В. "Анализ влияния несимметрии облучения в экспериментах по сжатию капсул на лазерной установке "ИСКРА-5". Сборник трудов научной сессии МИФИ 2009, в печати.

5. В.Б.Розанов, Н.В.Змитренко, Н.Г.Прончева, Р.А.Яхин. «Закон роста ширины зоны перемешивания, численные расчеты и аналитическая модель». Препринт ФИАН №28, 2005.
6. В. Розанов, Р. Степанов, А. Нужный, Р. Яхин, М. Анучин, Н. Прончева, Н. Змитренко, Ю. Янилкин, В. Тишкин. “Скорость роста зоны перемешивания в прямом численном моделировании и вейвлет-анализ развития многомодовой Релей-Тейлоровской неустойчивости”. Препринт ФИАН, № 28, 2004.
7. V.B. Rozanov, R. Yakhin, N. Zmitrenko et al. “Compression and Thermonuclear Yield of Laser Targets under Conditions of HiPER Facility with due to Regards for Irradiation Asymmetry”. Proc. of the XXX ECLIM, Darmshtadt, 2008, be in print.
8. V.B. Rozanov, R. Yakhin, N. Zmitrenko et al. “The mixing zone growth laws based on the evolution theory and evolution of neutron yield decreasing”. Proc. of the XXX ECLIM, Darmshtadt, 2008, be in print.
9. I. Doskoch, N. Proncheva, V. Rozanov, R. Stepanov, R. Yakhin , N. Zmitrenko. “The Evolution Model of Mixing Zone Growth in the Case of a Spherical Shell Compression”. The 10th IWPCTM, Paris, France 17-21 July 2006. Proceedings, pp. 337-342.
10. Змитренко Н.В., Розанов В.Б., Степанов Р.В., Яхин Р.А. “Моделирование перемешивания и роль несимметрии облучения при сжатии лазерных термоядерных мишеней”. XXXVI Международная (Звенигородская) конференция по физике плазмы и управляемому термоядерному синтезу, (г. Звенигород, 9-13 февраля 2009 г.).
11. Gus'kov S.Yu., Demchenko N.N., Doskoch I.Ya., Rozanov V.B., Stepanov R.V., Tishkin V.F., Vergunova G.A., Yakhin R.A., Zmitrenko N.V. “Mathematical modeling of the fast ignition laser targets and the HiPER project”. XXIV International Conference on Interaction of Intense Energy Fluxes with Matter. March 1-6, 2009, Elbrus, Kabardino-Balkaria, Russia.
12. Гуськов С.Ю., Демченко Н.Н., Доскоч И.Я., Змитренко Н.В., Розанов В.Б., Степанов Р.В., Тишкин В.Ф., Яхин Р.А., “Математическое моделирование сжатия лазерных мишеней для энергии лазера 1-2 кДж”. XXIII Международная конференция “Уравнения состояния вещества”. 1-6 марта 2008 г., Кабардино-Балкарская республика, Россия.
13. Аристова Е.Н., Розанов В.Б., Змитренко Н.В., Яхин Р.А., Баришпольцев Д.В., Лимпоух И. “Перенос энергии в малоплотных пористых средах легированных тяжёлыми элементами: анализ и моделирование экспериментальных результатов, полученных на установке PALS”. XXXV Международная (Звенигородская) конференция по физике плазмы и управляемому термоядерному синтезу, (г. Звенигород, 11-15 февраля 2008 г.).
14. Яхин Р.А., Розанов В.Б., Змитренко Н.В., Прончева Н.Г. “Модель перемешивания оболочек термоядерной лазерной мишени при сферическом сжатии.”. XXXIV Международная (Звенигородская) конференция по физике плазмы и управляемому термоядерному синтезу, (г. Звенигород, 12-16 февраля 2007 г.).

Список литературы.

1. The fifth International Conference on Inertial Fusion Sciences and Applications (IFSA2007). E I Moses. "Ignition on the National Ignition Facility". Journal of Physics: Conference Series, 112 (2008), 012003.
2. <https://lasers.llnl.gov>.
3. University of Rochester, LLE Review 109, 2006, Annual Report . "Performance of the 1-MJ, Wetted-Foam Target Design for the National Ignition Facility", pp. 26-36.
4. В.Б. Розанов. "Лазерный термоядерный синтез: исследования в ФИАНе схем и концепций лазерных мишеней". Квантовая электроника, 1997, № 12, 24.
5. Гамалий Е.Г. и др. "Теоретическое исследование устойчивости сжатия тонкостенных оболочечных мишеней, облучаемых лазерами с энергией в импульсе порядка 1 кДж". Квант. электроника, 1988. Е. 15, сс. 1622-1632.
6. И.Г. Лебо, В.Ф. Тишкин. "Исследование гидродинамической неустойчивости в задачах лазерного термоядерного синтеза". 2006. Москва. ФИЗМАТЛИТ.
7. Н.В. Змитренко, М.Е. Ладонкина, В.Ф. Тишкин. "Численное исследование турбулентного перемешивания для одной задачи о развитии неустойчивости Рихтмайера-Мешкова". ВАНТ. Сер. Математическое моделирование физических процессов. 2004. Вып. 1. С. 12 - 27.
8. D.C.Wilson, T.C.Sangster, P.S.Ebey *et al.* "Measuring the character and time dependence of mix in directly driven ICF implosions with pure tritium gas and a deuterated shell". Paris. 2006. Proceedings of 10 IWPCTM. P. 36 - 39.
9. В.Б. Розанов. "О возможности сферического сжатия мишеней с термоядерным горючим при использовании для облучения двух лазерных пучков". УФН. 2004. Т. 174. № 4. С. 371 - 382.
10. D.Galmishe, C.Cherfils. "Hydrodynamic Stability of Indirect-Drive Targets". In: Proceedings of ECLIM-2002, Moscow. Proceedings of SPIE. 2003. Vol. 5228. P.28-32.
11. A.W.Cook, W.Cabot, P.L.Miller. "The mixing transition in Rayleigh-Taylor instability". J.Fluid Mech. 2004. Vol. 511. P 333 - 362).
12. В.Ф. Тишкин, В.В. Никишин, И.В. Попов, А.П. Фаворский. "Разностные схемы трехмерной газовой динамики для решения задачи о неустойчивости Рихтмайера-Мешкова". Математическое моделирование. 1995. Т. 7, №5. С. 15 - 25.
13. Н.Н. Анучина, В.И. Волков, Н.С. Еськов. "Численный метод расчета контактных границ с большими деформациями". Международная конференция "Забабахинские научные чтения". Снежинск, 1998.
14. Н.Н. Анучина, В.И. Волков, В.А. Гордейчук, Н.С. Еськов, О.С. Илютина, О.М. Козырев. "Метод и комплекс программ МАХ-3 численного моделирования трехмерных задач газовой динамики". 1998. Тезисы докладов XII Всероссийской конференции "Теоретические основы и конструирование численных алгоритмов решения задач математической физики". Новороссийск.

15. Ю.В. Янилкин “Численное моделирование двумерных течений с учетом некоторых мелкомасштабных процессов”. Физическая мезомеханика. Т. 2, №5. С. 27 – 48. 1999.
16. Янилкин Ю.В., Шанин А.А., Ковалев Н.П., Гаврилова Е.С., Губков Е.В., Дарова Н.С., Дибиров О.А., Жарова Г.В., Калманович А.И., Павлуша И.Н., Самигулин М.С., Симонов Г.П., Синькова О.Г., Сотникова М.Г., Тарасов В.И., Торопова Т.А. Комплекс программ ЭГАК для расчетов двумерных течений многокомпонентной среды. ВАНТ, сер. ММФП, вып. 4, 69-75, 1993.
17. G. V. Zimmerman and W. L. Krueer. Comments Plas. Phys 2, 51 (1975).
18. The fifth International Conference on Inertial Fusion Sciences and Applications (IFSA2007). V. Rozanov, R. Yakhin, N. Zmitrenko et al. “Analysis of the Conditions of Experiments on the Compression of Capsules With a Foam Absorber at Iskra V Facility”. Journal of Physics: Conference Series 112 (2008) 022006.
19. M. Dunne, Nat. Phys. 2, 2006.
20. S. Atzeni, A. Schiavi. “Targets for direct-drive fast ignition at total laser energy of 200–400 kJ”. 2007. Physics of plasmas. 14, 052702.
21. S. Atzeni, J. Meyer-ter-Vehn. The Physics of Inertial Fusion (Oxford University Press, Oxford, 2004).
22. D. L. Youngs. Laser Part. Beams 12, 725 (1994).
23. Н.В. Змитренко, Н.Г. Прончева, В.Б. Розанов. “Эволюционная модель турбулентного слоя перемешивания”. Препринт ФИАН № 65, 1997.
24. В.Е. Неуважаев. «Математическое моделирование турбулентного перемешивания». 2007. Издательство РФЯЦ-ВНИИТФ. Снежинск.
25. В.Е. Неуважаев. «Развитие турбулентного перемешивания, вызванное неустойчивостью Рихтмайера-Мешкова (РМ)». Математическое моделирование. 1991. Т. 3. №7. С. 10 – 28.
26. С.З. Беленький, Е.С. Фрадкин. “Теория турбулентного перемешивания”. 1965. Труды ФИАН. Т. 29.
27. D. Layzer. “Astrophysical Journal On the stability of superpose fluids in an gravitational field”, 1955, v. 122, №1, pp.1-12.
28. D.L. Youngs. “Numerical simulation of turbulent mixing by Rayleigh-Taylor instability”. 1984. Physica D. Vol. 12. P. 32 - 44.
29. S. Gauthier, M. Bonnet. “A $k-\varepsilon$ model for turbulent mixing in shock-tube flows induced by Rayleigh-Taylor instability”. 1990. Physics of Fluids A. Vol. 2. No. 9. P. 1685 - 1694.
30. В.В. Никифоров. «Турбулентное перемешивание на контактной границе разноплотных сред». ВАНТ. 1985. Сер. Теоретическая и прикладная физика. Вып. 1. С. 3 - 8.
31. В.А. Андронов, С.М. Бахрах, В.Н. Мохов, В.В. Никифоров, А.В. Певницкий. «Влияние турбулентного перемешивания на сжатие лазерных мишеней». Письма в ЖЭТФ. 1979. Т. 29. №1. С. 62 - 65.
32. 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. 1979. Т. 30. №6. С. 339 - 342.
33. В.А. Андронов, С.М. Бахрах, Е.Е. Мешков, В.В. Никифоров, А.В. Певницкий, А.И. Толшмяков. «Экспериментальное исследование и численное

- моделирование турбулентного перемешивания в одномерных течениях». Доклады АН СССР. 1982. т.264. №1. С. 76 - 82.
34. Е.С. Фрадкин. "Исследование устойчивости произвольного одномерного гидродинамического течения". 1965.Труды ФИАН. Т. 29.
35. A.N.Aleshin, E.V.Lazareva, E.I.Chebotareva, S.V.Sergeev, S.G.Zaytsev. "Investigation of Richmayer-Meshkov instability induced by the incident and the reflected shock waves". Proc. of the Sixth International on the Physics of Compressible Turbulent Mixing, Marseille, 1997, pp.1-6.
- 36.С.Ю. Гуськов, Н.Н. Демченко, В.Б. Розанов, Р.В. Степанов, Н.В. Змитренко, А.Карузо, К. Странгио. "Симметричное сжатие мишени "Лазерный Парник" малым числом лазерных пучков", Квантовая электроника, 33(2), 95, 2003.
- 37.University of Rochester, LLE, 2003, Annual Report . "On the Bell-Plesset Effects: The Effects of Uniform Compression and Geometrical Convergence on the Classical Rayleigh-Taylor Instability". University. pp. 81-90.