

На правах рукописи



Кучугов Павел Александрович

**Динамика процессов турбулентного  
перемешивания в лазерных мишенях**

01.02.05 – Механика жидкости, газа и плазмы

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук

Москва – 2014

Работа выполнена в Институте прикладной математики им. М.В. Келдыша Российской академии наук.

Научный руководитель: доктор физ.-мат. наук, профессор,  
Змитренко Николай Васильевич

Научный консультант: доктор физ.-мат. наук, профессор,  
Розанов Владислав Борисович

Официальные оппоненты: доктор физ.-мат. наук, профессор,  
профессор МИРЭА,  
Лебо Иван Германович, МИРЭА  
кандидат физ.-мат. наук,  
нач. лаб. ИЛФИ РФЯЦ-ВНИИЭФ,  
Бондаренко Сергей Викторович,  
ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ»

Ведущая организация: Институт автоматизации проектирования РАН

Защита состоится «22» мая 2014 г. в 14<sup>00</sup> часов на заседании диссертационного совета Д 002.024.03 при Институте прикладной математики им. М.В. Келдыша РАН, расположенном по адресу: 125047, г. Москва, Миусская пл., д.4

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Института прикладной математики им. М.В. Келдыша РАН.

Автореферат разослан «21» апреля 2014 г.

Отзывы и замечания по автореферату в двух экземплярах, заверенные печатью, просьба высылать по вышеуказанному адресу на имя ученого секретаря диссертационного совета.

Ученый секретарь  
диссертационного совета, д.ф.-м.н.



*Змитренко Н.В.*

## Общая характеристика работы

**Актуальность работы.** Основным объектом исследований в данной работе являются гидродинамические неустойчивости. Для лазерных мишеней существенными оказываются неустойчивость Рэлея–Тейлора (далее НРТ), абляционная неустойчивость, неустойчивость Рихтмайера–Мешкова. Интерес в этих случаях представляет рост возмущений начиная с линейной стадии и вплоть до стадии развитого перемешивания.

Хорошо известно, что НРТ наблюдается в широком диапазоне астрофизических, атмосферных, океанических и геофизических явлений, играет решающую роль во многих инженерных приложениях. Одним из таких приложений является лазерный термоядерный синтез (далее ЛТС), идея которого заключается в быстром и близком к сферически-симметричному сжатию термоядерного топлива. Пожалуй, ключевой здесь является “симметрия сжатия”, т.к. основным препятствием на пути к достижению горения являются разного рода неустойчивости, порождаемые неоднородностью освещения, шероховатостью оболочек самой мишени, ошибками в профилировании лазерных импульсов и т.д., которые, развиваясь, снижают эффективность сжатия [15–20]. Перемешивание имеет далеко идущие последствия, меняя свойства веществ и физику протекающих явлений.

В последние годы исследования задач ЛТС получили новый мощный толчок, стимул к дальнейшему более тщательному изучению всех аспектов сжатия мишеней, после того как на самой мощной на сегодняшний день действующей лазерной установке NIF зажигание, намеченное на октябрь 2012 года, достигнуто не было [21, 22]. Важно, что чуть ранее было принято решение о строительстве российской лазерной установки мегаджоульного уровня и реализации отечественной программы по лазерному термоядерному синтезу [23].

При всех существующих на сегодняшний день пробелах в понимании и описании физических процессов, протекающих при сжатии термоядерных ми-

шеней, нельзя отрицать, что в последние десятилетия были достигнуты значительные успехи в исследованиях задач ЛТС. Оставаясь в рамках основной цели данной работы, заключающейся в изучении влияния различных факторов на развитие гидродинамических неустойчивостей и перемешивания, отметим, что в этом направлении также наблюдается прогрессивное движение. Помимо описания развития малых возмущений, появились асимптотические модели для описания динамики струй и пузырей, был произведён учёт сжимаемости веществ в рамках этих подходов, исследованы различные стабилизирующие факторы, такие как поверхностное натяжение, вязкость, конвективный снос вещества через абляционную поверхность и т.д. В рамках классической теории возмущений произведён учёт следующих членов в разложениях, что позволяет включить в рассмотрение слабонелинейную стадию развития возмущений, а также затронуть вопрос о взаимодействии мод. Для стадии развитого турбулентного перемешивания появились различные многопараметрические модели. Значительные успехи были достигнуты в численном моделировании перемешивания, индуцированного неустойчивостями. Несмотря на это, ещё много вопросов по-прежнему остаются без ответов. Так, например, нет полной теории, описывающей переход от линейной стадии к нелинейной. Также необходимо дальнейшее изучение эффектов сжимаемости, диффузии, сходящейся геометрии и влияния начальных условий, особо заметно проявляющих себя в лазерных мишенях. Исследование зависимости скорости роста неустойчивости от любого из этих факторов на поздних временах является важной задачей, т.к. возникающие впоследствии длинноволновые возмущения не могут быть устранены в экспериментах и могут оказывать негативное воздействие на процесс сжатия мишени.

Некоторые из вышеобозначенных проблем более подробно изложены ниже.

**Цель диссертационной работы** состоит в исследовании влияния начальных условий на явление гравитационного перемешивания разноплотных веществ, а также выяснение особенностей протекания процессов, связанных с

учётом сжимаемости (конечной скорости распространения возмущений и стратифицированности) применительно к задачам ЛТС. Для достижения поставленных целей, во-первых, была проведена верификация разработанного ранее эволюционного подхода [24] на новых прецизионных данных, а также были предложены варианты его модификации для учёта различного вида начальных возмущений и сопутствующих перемешиванию физических эффектов, таких как наличие градиента плотности, асимметрии развития струй и пузырей и т.д. Во-вторых, в связи с необходимостью проведения численных расчётов в совокупности с теоретическими исследованиями, была проведена переработка численного кода NUT с использованием технологии CUDA для реализации возможности параллельного исполнения на GPU-устройствах для достижения максимальной скорости получения результатов моделирования при значительных требованиях к их точности.

**Научная новизна.** В рамках выполнения данной работы был проведён комплексный анализ влияния различных факторов на перемешивание, наблюдаемое при лазерном сжатии термоядерных мишеней. Был скорректирован и улучшен развитый ранее [24] теоретический подход для описания эволюции возмущений: впервые было проанализировано влияние конечного градиента плотности в рамках данного подхода и учтена асимметрия развития струй и пузырей. На основании проведённых исследований была предложена новая формулировка закона роста ширины зоны перемешивания, которая намного лучше передаёт закономерности, наблюдаемые в численных и натуральных экспериментах. При этом были выявлены новые особенности развития многомодовых возмущений при сравнении их динамики в 2D и 3D геометрии.

Проделанный анализ сопровождался проведением большого количества численных расчётов. Для более эффективного выполнения моделирования задач перемешивания была реализована параллельная версия программы, использующая графические ускорители, в двух различных вариантах. На гибридном кластере К-100 ИПМ им. М.В. Келдыша было проведено сравнение этих вари-

антов и определено ускорение вычислений, получаемое относительно последовательной версии программы. Также была определена оптимальная программная конфигурация для расчётов на прямоугольных сетках при моделировании задач гравитационного перемешивания.

**Практическая значимость.** Результаты, изложенные в диссертации, могут быть использованы для описания и анализа экспериментальных данных, для выполнения физически адекватных оценок скорости роста возмущений, опираясь на данные об их параметрах на начальный момент времени. Представленная реализация параллельного алгоритма позволяет в разы быстрее проводить численное моделирование различных задач по исследованию развития контактных, сдвиговых и других неустойчивостей, чем последовательная версия. Также проведение расчётов на кластере позволяет оперировать значительно большими объёмами данных, чем это доступно на современных персональных компьютерах.

**На защиту выносятся следующие основные результаты и положения:**

1. Исследование влияния начальных возмущений на поздние стадии процесса развития НРТ, позволившее установить существование ограничения на вид начальных возмущений, при которых возможна реализация автомоделного режима.
2. Развитие теоретического подхода для описания эволюции перемешивания в результате действия НРТ, а именно, включение в рассмотрение и исследование влияния на параметры модели: а) наличия конечного градиента плотности между веществами, б) асимметрии развития струй и пузырей, в) возможности развития азимутальных мод.
3. Уточнение параметров эволюционной теории, определяющих законы роста зоны перемешивания, для учёта более сложных трёхмерных ситуаций (нарушение осевой симметрии цилиндрических струй, случайный характер начальных возмущений и т.д.).

4. Проведение вычислительных экспериментов и теоретических оценок для выяснения степени влияния сжимаемости веществ на динамику развития НРТ на линейной и нелинейной стадиях для диапазонов параметров, присущих лазерным мишеням.
5. Создание и реализация параллельной программы для проведения расчётов по перемешиванию на графических ускорителях (GPU).

**Апробация работы.** Основные результаты диссертации докладывались на следующих российских и международных конференциях и семинарах:

- XLI Международная (Звенигородская) конференция по физике плазмы и УТС, Звенигород, 10–14 февраля, 2014.
- International conference Turbulent and Wave Processes, Moscow, Russia, 26–28 November, 2013.
- Mathematical Modelling and Computational Physics, Dubna, Russia, 6–12 July, 2013.
- XV Харитоновские тематические научные чтения, Саров, Россия, март, 2013.
- The 13<sup>th</sup> International Workshop on the Physics of Compressible Turbulent Mixing, Woburn, UK, July, 2012.
- XXXIX Международная (Звенигородская) конференция по физике плазмы и УТС, Звенигород, 6–10 февраля, 2012.
- V Всероссийская школа для студентов, аспирантов, молодых учёных и специалистов по лазерной физике и лазерным технологиям, Саров, Россия, апрель, 2011.
- The 12<sup>th</sup> International Workshop on the Physics of Compressible Turbulent Mixing, Moscow, Russia, July, 2010.

**Публикации.** Материалы диссертации опубликованы в 14 печатных работах [1–14], из них 2 статьи в рецензируемых журналах [1, 2], 1 статья в сборниках трудов конференций [3] и 11 тезисов докладов [4–14].

**Личный вклад автора.** Содержание диссертации и основные положения, выносимые на защиту, отражают персональный вклад автора в опубли-

кованные работы. Подготовка к публикации полученных результатов проводилась совместно с соавторами, причем вклад диссертанта был определяющим. Все представленные в диссертации результаты получены лично автором.

**Структура и объем диссертации.** Диссертация состоит из введения, 6-ти глав, заключения и библиографии. Общий объем диссертации составляет 149 страниц. Библиография включает 184 наименования на 23 страницах.

## Содержание работы

**Во введении** обоснована актуальность диссертационной работы, сформулирована цель и аргументирована научная новизна исследований, показана практическая значимость полученных результатов, представлены выносимые на защиту научные положения.

**В первой главе** представлен обзор основополагающих работ для выбранной тематики исследования. Здесь обсуждаются основные аспекты, связанные с задачами лазерного термоядерного синтеза, влияющие на развитие неустойчивостей при сжатии мишеней, такие как сжимаемость веществ, сходящаяся геометрия, наличие переходного слоя между веществами, ограниченность областей течения (конечные массы веществ), и приводятся достигнутые на сегодняшний день успехи в изучении упомянутых факторов. Также проводится обзор работ, касающихся различных стадий процесса перемешивания начиная с линейной стадии и заканчивая стадией развитой турбулентности, обсуждаются различные развитые подходы, как теоретические, так и численные, для анализа явления перемешивания. Содержание первой главы даёт понять, что выбранная тематика работы является востребованной мировым научным сообществом, а также, что до сих пор существует достаточно большое число нерешенных задач, которые требуют проведения дальнейших исследований. Среди них можно выделить влияние начальных условий на поздние стадии процесса, а также влияние сжимаемости и конечности скорости звука на динамику перемешивания.



Все эти вопросы в той или иной степени отражены в данной работе.

**Во второй главе** приводится описание численной методики, используемой для моделирования перемешивания. На сегодняшний день уровень теоретических работ в основном определяется возможностью проведения детальных численных расчётов, так как проведение экспериментальных исследований представляется технически трудоёмким и дорогостоящим. Данная работа не является исключением: значительная часть результатов была получена посредством численного моделирования. При рассмотрении физически осмысленных постановок возникающие размеры счётных областей и масштабы возмущений требуют значительного количества ячеек для обеспечения необходимого разрешения структур течения. В сумме с вычислительной сложностью алгоритма (решение задачи о распаде разрыва на каждой грани), продиктованной выбранной численной методикой, данная задача представляется достаточно ресурсоёмкой. В связи с этим перспективным является параллельная реализация алгоритма. По этой причине имеющийся численный код NUT [25] был переработан с целью реализации возможности запуска на GPU-устройствах (технология CUDA). Для полученного программного комплекса были проведены тестовые численные расчёты, а также проведена оценка достигаемого ускорения по сравнению с последовательной реализацией при запуске на гибридном кластере ИПМ им. М.В. Келдыша К-100. Определена оптимальная конфигурация параметров, дающая максимальное ускорение в 65 раз и представляющая собой баланс между вычислительной сложностью каждого из потоков и общим количеством потоков.

Также в данной главе проведена серия численных расчётов развития одномодового возмущения в 2D и 3D геометрии для различных чисел Атвуда. Выполнен анализ эволюции таких интегральных характеристик, как ширина зоны турбулентного перемешивания, глубина проникновения тяжёлой жидкости в лёгкую, масса струи. Было показано, что для упомянутых зависимостей наблюдается смена режима, которая соответствует значению параметра  $kL_b \approx 1$ ,

где  $k$  – волновое число,  $L_b$  – глубина проникновения лёгкой жидкости в тяжёлую, причём для всех значений чисел Атвуда  $A$ . Это в дальнейшем позволило развить теоретический подход для описания процесса развития РТ-подобных неустойчивостей и самой НРТ.

**В третьей главе** проводится исследование влияния сжимаемости веществ на динамику развития НРТ. Следует отметить, что здесь возможно несколько вариантов: во-первых, изменение плотности фонового течения со временем, во-вторых, стратификация начальных профилей гидродинамических величин, в-третьих, сжимаемость развивающихся возмущений (конечность скорости звука). В данной главе проводится совместное исследование последних двух случаев. В первой части главы даётся краткий обзор работ, посвящённых сжимаемости на линейной стадии НРТ, вводятся основные влияющие параметры, соответствующие статической и динамической сжимаемости, даётся оценка эффекта в целом, согласно которой можно сделать вывод, что при рассмотрении процессов в лазерных мишенях сжимаемость возмущений можно не учитывать. Выводы, следующие из линейного анализа, можно сформулировать следующим образом: а) инкремент неустойчивости снижается при усилении стратифицированности веществ, б) инкремент растёт с ростом показателей адиабаты веществ, в) эффекты сжимаемости более существенны для длинноволновых возмущений и для малых чисел Атвуда, г) инкремент больше в случае, когда лёгкая жидкость более сжимаема, чем тяжёлая.

Во второй части главы сформулированы постановки для проведения численных расчётов с различными параметрами сжимаемости, а также представлены результаты проведённого численного моделирования по предложенным постановкам. Анализ интегральных характеристик зоны турбулентного перемешивания показывает, что в рассмотренных диапазонах изменения параметров сжимаемость не оказывает существенного влияния на развитие возмущений как на линейной, так и на нелинейной стадиях. Однако, при этом наблюдаются небольшие различия в динамике развития вторичной неустойчивости

Кельвина–Гельмгольца, а именно, в величине доминантной длины волны в конкретный момент времени. Эти различия могут иметь более ощутимые последствия на более поздних временах на стадии развитого перемешивания в случае многомодовых начальных возмущений.

**Четвертая глава** является центральной в представляемой работе и содержит описание и основные положения развиваемого теоретического подхода для анализа неустойчивостей типа НРТ. Основная идея заключается в предположении, что под действием вторичной неустойчивости Кельвина–Гельмгольца (далее НКГ) происходит разрушение основной структуры течения НРТ. Данное высказывание можно записать в следующем математическом виде:

$$\zeta(t_*) \approx d(t_*) \text{ или } \zeta(t_*) \approx r(t_*), \quad (1)$$

где  $t_*$  – соответствует моменту разрушения (будем называть данный момент времени критическим),  $\zeta$  – амплитуда НКГ,  $d$  или  $r$  – поперечный размер плоской или радиус цилиндрической струи. Предполагая, что после критического момента масса струи и глубина проникновения лёгкой жидкости в тяжёлую практически не меняется, можно получить соотношения для вычисления “критического” возраста  $\alpha_*$ , соответствующего моменту разрушения основного возмущения. Под возрастом здесь и в дальнейшем будем понимать произведение волнового числа  $k$  на полную высоту возмущения  $a$ , т.е.  $ka$ . В результате было получено, что значение “критического” возраста различно в 2D и в 3D геометрии (больше в 3D). Также следует отметить, что “критический” возраст снижается при сближении плотностей веществ, т.е. при  $\rho_L \rightarrow \rho_H$ .

Были проведены новые важные доработки теоретического подхода: исследовано влияние азимутальных мод на величину “критического” возраста – с возрастанием азимутального числа “критический” возраст снижается; учтена асимметрия развития струй и пузырей – при близких плотностях наблюдается возрастание “критического” возраста по сравнению со случаем без учёта асимметрии, при существенно различающихся плотностях – снижение.

При наличии в начальном возмущении нескольких мод с одинаковыми возрастными можно получить классический закон  $L = \alpha A g t^2$  для ширины зоны перемешивания, где коэффициент пропорциональности  $\alpha$  в эволюционной теории будет определяется выражением  $\alpha = \alpha_{ET}$ ,

$$\alpha_{ET} = \frac{\alpha_*}{\ln^2 \frac{2\alpha_*}{\alpha_0}}, \quad (2)$$

здесь  $\alpha_*$  – критический возраст,  $\alpha_0$  – начальный возраст возмущений. Предложенный подход допускает возможность его расширения для учёта дополнительных обстоятельств развития неустойчивости и дальнейшего перемешивания. Одной из таких модификаций является учёт влияния конечного градиента плотности между веществами. В этом случае значение коэффициента  $\alpha_{ET}$  снижается, причём в большей степени в 3D случае, т.к. значение “критического” возраста выше.

Дальнейшее развитие эволюционного подхода позволило учесть наличие в начальном возмущении мод с различными возрастными, подчиняющимися закономерности  $\alpha_0 = \alpha_1 \left(\frac{\lambda}{\lambda_1}\right)^{m-1}$ , где  $\alpha_1$  и  $\lambda_1$  – масштабные факторы. В случае реализации данного спектрального закона можно получить следующую логарифмическую зависимость между шириной зоны турбулентного перемешивания и коэффициентом пропорциональности  $\alpha_{ET}$ :

$$\frac{1}{\sqrt{\alpha_{ET}}} = b_1 + b_2 \ln \frac{L}{\lambda_1}, \quad (3)$$

где  $b_1 = \frac{1}{\sqrt{\alpha_*}} \left( \ln \frac{2\alpha_*}{\alpha_1} - (m-1) \ln \frac{2\pi}{\alpha_*} \right)$ ,  $b_2 = -\frac{1}{\sqrt{\alpha_*}} (m-1)$ . Применяя данную зависимость к имеющимся экспериментальным и численным данным, можно получить спектральные характеристики возмущений, определяющих развитие неустойчивости для анализируемого временного интервала. Отметим, что значение параметра  $m = 1$  возвращает нас к формуле (2).

**В пятой главе** выполнена проверка полученных ранее формул и зависимостей, выражающихся формулами (2) и (3). Проведён анализ численных [26,

27] и экспериментальных результатов [28]. С точностью до определения начальных данных, которые не всегда хорошо известны, результаты экспериментальных данных и данных численных расчётов хорошо соответствуют предложенной теоретической формуле (3). Необходимо отметить важное свойство данной зависимости – изменению её наклона соответствует перестройка спектра возмущений, дающих основной вклад в рост турбулентного слоя на данный момент времени, при развитии неустойчивости. Для выяснения влияния начального спектра также была проведена совместная работа с РФЯЦ-ВНИИЭФ по постановке и выполнению расчётов с помощью методики ТРЭК [29] с хорошо детерминированными начальными возмущениями. Сформулированные постановки представлены в тексте главы, а также приведены результаты моделирования в 2D и 3D геометрии. При анализе этих данных было обнаружено, что расчёты с одинаковыми типами возмущений (многомодовое возмущение контактной границы или случайные возмущения плотности) демонстрируют близкие зависимости для ширины зоны перемешивания в различных геометриях. Дальнейший сравнительный анализ с теоретическими значениями показал, что значение “критического” возраста в 3D случае ниже, чем ожидалось, и близко к значению 6.28 для  $A = 0.5$ . Ранее в [24] полагалось, что для того же значения числа Атвуда  $\alpha_* \approx 15.2$ . Выяснению причин снижения “критического” возраста посвящена следующая глава, содержащая дополнительную серию численных расчётов. При использовании нового значения “критического” возраста оказывается возможным получить практически полезные следствия, например, то, что в этом случае ширина зоны перемешивания определяется горизонтальным масштабом течения (или доминантной длиной волны  $\lambda_d$ ). Это, в свою очередь, даёт эволюционное поведение  $\lambda_d$ , а также возможность проведения простой оценки скорости роста зоны турбулентного перемешивания.

Для части расчётов были вычислены спектральные параметры возмущений  $m$ . Проанализированные постановки в логарифмическом представлении (3) демонстрируют характерную картину – “ковшеобразная” кривая, участки кото-

рой можно аппроксимировать прямыми. Получаемые при этом спектры являются физически не противоречивыми и соответствуют наблюдаемому укрупнению масштабов течения при развитии НРТ.

Также на основании этой серии расчётов выявилась существенная зависимость от начальных условий, наблюдающаяся и на поздних временах. Это говорит о том, что автомодельная стадия не реализовывается в данных постановках, т.е. имеет ограниченный (возможно достаточно узкий) интервал для возникновения.

Основные результаты пятой главы опубликованы в работе [1].

**В шестой главе** в связи с необходимостью выяснения причин сближения интегральных характеристик, а именно, ширины зоны перемешивания в 2D и 3D геометрии для расчётов из предыдущей главы, были сформулированы дополнительные постановки и проведены численные расчёты. Данная серия расчётов включала в себя как одномодовые возмущения, так и возмущения плотности – случайные и регулярные (типа “шахматная доска”) – в различных геометриях. Был проведён сравнительный анализ динамики роста возмущений для упомянутых случаев, на основе которого можно сделать следующие выводы: одномодовые возмущения и возмущения плотности демонстрируют различное поведение при их сопоставлении в 2D и 3D случае. Так, 2D и 3D одномодовые возмущения развиваются одинаково до конца линейной стадии и некоторое время после, а уже затем 3D возмущения начинают расти быстрее. Данный факт не противоречит теоретическому анализу, а также согласуется с развиваемым эволюционным подходом, в котором 3D возмущение разрушается позднее 2D, т.е. является более устойчивым. Двумерные и трёхмерные возмущения плотности, как случайные, так и регулярные, в свою очередь растут сопоставимо на протяжении всего времени счёта. Это наблюдение можно описать снижением “критического” возраста в 3D случае до уровня 2D, как было показано в пятой главе. Наиболее вероятными причинами здесь представляются формирование двумерных структур в трёхмерном течении, а также изгиб цилиндрических струй при вза-

и взаимодействии мод друг с другом. Однако возможным остаётся сближение  $L(t)$  и за счёт формирования переходного слоя между веществами, как было показано в четвёртой главе, при развитии и разрушении коротковолновых возмущений на начальных этапах процесса перемешивания.

Несмотря на близость некоторых интегральных характеристик в 2D и 3D случае для расчётов со случайными возмущениями плотности, они не являются полностью идентичными. На основе сравнения значений приведённой максимальной энергии пульсаций можно утверждать, что в 3D случае наблюдается более интенсивное перемешивание веществ. Анализ профилей пульсаций плотности на различные моменты времени тем не менее опять даёт близкие результаты для 2D и 3D возмущений: распространение пульсаций плотности вверх и вниз происходит одинаковым образом в 2D и 3D случае.

**В Заключение** к работе представлены основные результаты проведённого исследования. Они состоят в следующем:

- Была проведена верификация подхода, теоретически определяющего величину коэффициента  $\alpha$  в законе роста ширины зоны перемешивания и представленного в [24]. Уточнены значения параметров модели на основе прямого численного моделирования. Было получено, что для многомодового возмущения значение “критического” возраста в 3D случае близко к 2D. Дано объяснение этого факта, заключающееся в том, что в 3D случае со случайными начальными возмущениями, как правило, образуются “вытянутые” структуры, развивающиеся в соответствии с 2D закономерностями.
- В теоретическое рассмотрение включены дополнительные физические эффекты, такие как наличие градиента плотности, присутствие азимутальных мод и имеющая место асимметрия развития струй и пузырей, и исследовано их влияние на параметры модели. Было выяснено, что наличие градиента плотности снижает полученное ранее значение коэффициента пропорциональности  $\alpha_{ET}$ , что приводит к более медленному росту ширины зоны перемешивания.

Наличие асимметрии в развитии струй и пузырей приводит к небольшим корректировкам “критического” возраста для близких и сильно различающихся плотностей веществ, участвующих в перемешивании. Наличие же азимутальных мод во всём диапазоне изменения  $\delta = \frac{\rho_L}{\rho_H}$  приводит к снижению “критического” возраста, что в свою очередь, также может заметно изменить величину  $\alpha_{ET}$ .

- Исследовано влияние начальных возмущений на динамику развития НРТ. Предложено аналитическое представление данных, позволяющее анализировать эволюцию влияющей на рост ширины зоны перемешивания части спектра в процессе развития неустойчивости. Проанализированные численные расчёты позволяют сделать следующие два утверждения: влияние начальных возмущений прослеживается вплоть до поздних стадий, что говорит о нереализуемости автомоделной стадии в данных случаях; обнаруженное и теоретически описанное непостоянство коэффициента  $\alpha$  в законе роста зоны перемешивания свидетельствует о перестройке спектра и соответствует физически наблюдаемому укрупнению масштабов течения.
- Проведены численные расчёты для исследования влияния статической (стратификация) и динамической (конечная скорость звука) сжимаемости на нелинейную стадию процесса развития НРТ в лазерных мишенях. На основе полученных результатов определено эволюционное поведение ширины зоны перемешивания при варьировании значений параметров сжимаемости.
- Создан и реализован параллельный алгоритм с использованием технологии CUDA для проведения ресурсоёмких численных расчётов и поддержания получаемых результатов на высоком уровне.



## Список публикаций

1. Kuchugov P., Zmitrenko N., Rozanov V. et al. The evolution model of the Rayleigh–Taylor instability development // [Journal of Russian Laser Research](#). 2012. Vol. 33, no. 6. P. 517–530.
2. Кучугов П. А., Шувалов Н. Д., Казённов А. М. Моделирование задач гравитационного перемешивания на GPU // Вестник РУДН. Серия Математика. Информатика. Физика. 2014. Т. 2, № 2. С. 225–230.
3. Кучугов П. А., Змитренко Н. В., Розанов В. Б. Роль начальных условий в проблеме перемешивания в задачах ЛТС // Сборник докладов. Пятая все-российская школа для студентов, аспирантов, молодых ученых и специалистов по лазерной физике и лазерным технологиям / Под ред. С. Г. Гаранина. ФГУП “РФЯЦ-ВНИИЭФ”, Саров, 2011.
4. Кучугов П. А., Змитренко Н. В., Розанов В. Б. Влияние сжимаемости веществ на развитие неустойчивости Рэлея–Тейлора в лазерных мишенях // Сборник тезисов ХLI Международной (Звенигородской) конференции по физике плазмы и УТС. 2014. С. 122.
5. Kuchugov P. Simulation of the Gravitational Mixing on GPU // Book of Abstracts of The International Conference Mathematical Modelling and Computational Physics, Dubna. 2013.
6. Kuchugov P., Zmitrenko N., Rozanov V. The development of two- and three-dimensional multimode perturbation under the influence of the gravitational Instability // Book of Abstracts of the International conference Turbulent and Wave Processes, Moscow, November 26-28. Moscow State University, 2013. P. 53–54. Dedicated to the centenary of M.D. Millionshchikov.
7. Кучугов П. А., Змитренко Н. В., Розанов В. Б. Различия в развитии неустойчивости Рэлея–Тейлора в 2D и 3D геометрии // Сборник тезисов докладов

международной конференции “XV Харитоновские тематические научные чтения”. ФГУП “РФЯЦ-ВНИИЭФ”, Саров, 2013.

8. Kuchugov P., Zmitrenko N., Rozanov V., Yanilkin Y. RT instability development and mixing: the analysis of 2D simulations and comparison with 3D ones on the evolution model base // The 13<sup>th</sup> International workshop on the Physics of Compressible Turbulent Mixing (IWPCTM13), Program and Bound Abstracts. Cranfield University, Cranfield, 2012.
9. Rozanov V., Yakhin R., Zmitrenko N. et al. RT instability development and mixing: the analysis of 3D simulation on the evolution model base // The 13<sup>th</sup> International workshop on the Physics of Compressible Turbulent Mixing (IWPCTM13), Program and Bound Abstracts. Cranfield University, Cranfield, 2012.
10. Zmitrenko N., Kuchugov P., Rozanov V., Yakhin R. A theory of a gravitational mixing zone growth including a dependence of the  $\alpha$ -coefficient on time // The 13<sup>th</sup> International workshop on the Physics of Compressible Turbulent Mixing (IWPCTM13), Program and Bound Abstracts. Cranfield University, Cranfield, 2012.
11. Кучугов П. А., Змитренко Н. В., Розанов В. Б. и др. Эволюционная теория турбулентного перемешивания // Сборник тезисов XXXIX Международной (Звенигородской) конференции по физике плазмы и УТС. ЗАО НТЦ “ПЛАЗМАИОФАН”, Москва, 2012.
12. Zmitrenko N., Kuchugov P., Rozanov V. et al. Nonuniform compression and burn of laser ICF targets // Book of Abstract of XXVI International conference Interaction of Intense Energy Fluxes with Matter – Elbrus 2011. Типография ИПХФ РАН, Черноголовка, 2011.
13. Змитренко Н. В., Кучугов П. А., Розанов В. Б. и др. Неоднородное сжатие

и горение термоядерных мишеней // Сборник тезисов XXXVIII Международной (Звенигородской) конференции по физике плазмы и УТС. 2011.

14. Rozanov V., Stepanov R., Yakhin R. et al. Turbulent Mixing under Laser Target Compression: Evolution Model and Numerical Simulation // Book of Abstracts of The 7<sup>th</sup> International Conference on Inertial Fusion Sciences and Applications, Bordeaux-Lac, France. 2011.

## Цитированная литература

15. Marinak M. M., Tipton R. E., Landen O. L. et al. Three-dimensional simulations of Nova high growth factor capsule implosion experiments // [Physics of Plasmas](#). 1996. Vol. 3, no. 5. P. 2070–2076.
16. Бельков С. А., Бессараб А. В., Винокуров О. А. и др. Исследование влияния крупномасштабной асимметрии оболочки на работу мишени на установке “Искра-5” // Письма в ЖЭТФ. 1998. Т. 67, № 3. С. 161–165.
17. Christensen C. R., Wilson D. C., Barnes C. W. et al. The influence of asymmetry on mix in direct-drive inertial confinement fusion experiments // [Physics of Plasmas](#). 2004. Vol. 11, no. 5. P. 2771–2777.
18. Atzeni S., Schiavi A., Temporal M. Converging geometry Rayleigh–Taylor instability and central ignition of inertial confinement fusion targets // [Plasma Physics and Controlled Fusion](#). 2004. Vol. 46, no. 12B. P. B111.
19. Neutron Yield Study of Direct-Drive, Low-Adiabatic Cryogenic D<sub>2</sub> Implosions on OMEGA // LLE Review. Quarterly Report. University of Rochester Laboratory for Laser Energetics, 2008. Vol. 116.
20. Dodd E. S., Benage J. F., Shah R. C. et al. Yield degradation in ICF capsule implosions due to imposed initial asymmetries: Tech. rep.: Los Alamos National Laboratory, 2012. LA-UR-13-20274.

21. Editorial. Ignition switch // [Nature](#). 2012. — November. Vol. 491, no. 7423. P. 159.
22. Clery D. Ignition Facility Misses Goal, Ponders New Course // [Science](#). 2012. Vol. 337, no. 6101. P. 1444–1445.
23. Гаранин С., Бельков С., Бондаренко С. Концепция построения лазерной установки УФЛ-2М // Сборник тезисов докладов XXXIX Международной (Звенигородской) конференции по физике плазмы и УТС, Звенигород, 6-10 февраля 2012. 2012. С. 17.
24. Змитренко Н. В., Прончева Н. Г., Розанов В. Б. Эволюционная модель турбулентного слоя перемешивания: Препринт 65: Физический институт им. П.Н. Лебедева, 1997.
25. Тишкин В. Ф., Никишин В. В., Попов И. В., Фаворский А. П. Разностные схемы трехмерной газовой динамики для задачи о развитии неустойчивости Рихтмайера-Мешкова // Математическое моделирование. 1995. Т. 7, № 5. С. 15–25.
26. Cook A. W., Cabot W., Miller P. L. The mixing transition in Rayleigh–Taylor instability // [Journal of Fluid Mechanics](#). 2004. — July. Vol. 511. P. 333–362.
27. Cabot W. H., Cook A. W. Reynolds number effects on Rayleigh–Taylor instability with possible implications for type-Ia supernovae // [Nature Physics](#). 2006. Vol. 2. P. 562–568.
28. Olson D. H., Jacobs J. W. Experimental study of Rayleigh–Taylor instability with a complex initial perturbation // [Physics of Fluids](#). 2009. Vol. 21, no. 3. P. 034103.
29. Янилкин Ю. В., Беляев С. П., Бондаренко Ю. А. и др. Эйлеровы численные методики ЭГАК и ТРЭК для моделирования многомерных тече-

ний многокомпонентной среды // Труды РФЯЦ–ВНИИЭФ. Издательство РФЯЦ–ВНИИЭФ, 2008. Вып. Математическое моделирование физических процессов, № 12.

---

Подписано в печать 17.04.2014. Формат 60 × 84/16. Усл. печ. л. 0,9. Тираж 75 экз. Заказ П-60.

ИПМ им. М.В. Келдыша РАН. 127047, Москва, Миусская пл., 4