

Федеральное государственное бюджетное учреждение
“Государственный Научный Центр Российской Федерации
Институт Теоретической и Экспериментальной Физики”
НИЦ “Курчатовский институт”

На правах рукописи

Глазырин Семен Игоревич

Свойства фронтов горения
в сверхновых типа Ia

Специальность 01.04.02 – теоретическая физика

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Москва – 2014 г.

УДК 524.352.3; 536.46; 524.7-466

Работа выполнена в ФГБУ “ГНЦ РФ ИТЭФ”
НИЦ “Курчатовский институт”, г. Москва.

Научный руководитель: доктор физ.-мат. наук
Сергей Иванович Блинников,
ведущий научный сотрудник
ФГБУ “ГНЦ РФ ИТЭФ”
НИЦ “Курчатовский институт”, г. Москва

Официальные оппоненты: доктор физ.-мат. наук
Константин Александрович Постнов,
профессор кафедры астрофизики
и звёздной астрономии,
физический факультет МГУ им М. В. Ломоносова

доктор физ.-мат. наук
Александр Васильевич Колдоба,
ведущий научный сотрудник
ИПМ им. М. В. Келдыша РАН, г. Москва

Ведущая организация: ФГБУН Физический институт им. П. Н. Лебедева
Российской академии наук, г. Москва

Защита диссертации состоится 27 мая 2014 г. в 11 часов на заседании диссертационного совета Д 201.002.01 ФГБУ “ГНЦ РФ ИТЭФ” НИЦ “Курчатовский институт” в конференц-зале ИТЭФ по адресу: г. Москва, ул. Б. Черемушкинская д. 25.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ИТЭФ. Также диссертация и автореферат доступны по запросу через электронную почту glazyrin@itep.ru.

Автореферат разослан “8” апреля 2014 г.

Ученый секретарь диссертационного совета
кандидат физ.-мат. наук

Васильев В. В.

Общая характеристика работы

Актуальность темы

Диссертационная работа посвящена исследованию механизмов взрыва астрофизических объектов – сверхновых типа Ia. Считается, что эти вспышки связаны с термоядерным прогоранием вырожденной звезды – белого карлика. Существуют несколько сценариев, по которым возможно такое прогорание. В диссертации был исследован только один из них – “одновырожденный” (когда белый карлик находится в двойной системе с невырожденной звездой). По этому сценарию взрыв связан с распространением волны горения, сначала дефлаграционной, потом детонационной, по белому карлику. Основная физическая задача в этом случае: каким образом дефлаграционное пламя переходит в детонацию в условиях сверхновой типа Ia? Есть серьёзные основания считать, что это происходит за счёт различных неустойчивостей горения. Эти неустойчивости изучались в многочисленных научных работах, но окончательная общепризнанная модель не построена.

В диссертации рассматриваются свойства пламени в белых карликах, а также проводится исследование неустойчивостей, которым пламя подвержено: термопульсационной, Ландау–Даррье, Рэлея–Тейлора–Ландау, и рассматривается взаимодействие пламени с возникающей в звезде турбулентностью. Такое исследование является основой для построения единой модели горения в сверхновых типа Ia.

Такие вспышки, как SNIa, являются одними из самых ярких во Вселенной, и позволяют заглянуть в самые удалённые области. Хорошая повторяемость параметров от вспышки к вспышке даёт возможность проводить количественные измерения. Благодаря этому свойству они получили название “стандартные свечи”. Космологические измерения эволюции масштабного фактора с помощью SNIa позволили сделать недавнее важнейшее открытие ускоренного расширения Вселенной (Рисс и др. 1998, Перлмуттер и др. 1999), которое было удостоено Нобелевской премии по физике 2011 года. Поэтому понимание физики таких взрывов необходимо для надёжного обоснования подобных наблюдений. Термин “стандартные свечи”, о ко-

тором упоминалось выше, иногда используется не совсем аккуратно. Его смысл в том, что светимость в максимуме практически одинакова для всех вспышек SNIa. На самом деле они не являются стандартными свечами в непосредственном понимании – их светимость в максимуме может различаться довольно сильно. Но, как было показано в работах Псковского (1977) и Филлипса (1993), светимость в максимуме полностью коррелирует со скоростью спада кривой блеска. Таким образом, эти вспышки могут быть стандартизованы, то есть правильная светимость каждой SNIa может быть восстановлена из других наблюдаемых параметров: процесс стандартизации записан в виде “соотношения Псковского–Филлипса”. Именно на него опираются все космологические наблюдения. И оно является их слабым местом: соотношение проверено только для близких расстояний, а используется на далёких. Сомнения в его справедливости связаны в первую очередь с тем, что состав Вселенной динамичен и раньше были другие распространённости элементов (тяжелые элементы, особенно железного пика, образуются как раз в сверхновых, поэтому их доля со временем увеличивается). Изменённый химсостав может влиять на стандартизованность SNIa, тем самым значительно искажать наблюдаемые параметры Вселенной на космологических расстояниях. А соотношение Псковского–Филлипса чисто эмпирическое и не имеет строгого доказательства из первых принципов или механизма взрыва, что является одной из основных задач для подобных исследований SNIa.

С другой стороны, исследование термоядерных сверхновых важно для физики горения. В сверхновых реализуются условия горения, уникальные для земных экспериментов. И дело не только в высоких температурах и плотностях. Горение в сверхновых происходит практически в среде без границ: характерные масштабы многих основных процессов на много порядков меньше размеров звезды. Это делает возможным развитие различных неустойчивостей и турбулентности в течении значительного времени и в значительных объёмах. Таким образом, проблема взрывов сверхновых типа Ia является хорошей академической задачей для изучения физики горения и неустойчивостей.

Цели и задачи диссертационного исследования

Общая цель работ, включенных в настоящую диссертацию – развитие моделей горения в сверхновых типа Ia. В настоящий момент задача о переходе дефлаграции в детонацию в условиях SNIa не решена. Необходимость такого перехода следует из наблюдений. Естественным объяснением для такого перехода является развитие неустойчивостей медленного горения. В результате, основной целью представленных работ является изучение различных неустойчивостей пламени в условиях SNIa и построение моделей для их описания.

Для этого решаются следующие задачи:

1. Исследуется микроскопическая структура пламени в сверхновой, вычисляются основные параметры нормального фронта горения.
2. Исследуется устойчивость фронта горения по отношению к термомултационной неустойчивости.
3. Исследуется неустойчивость Ландау–Даррье в условиях сверхновой Ia, но при горении в ограниченном пространстве – канале.
4. Выводится полуэмпирическая модель турбулентности с учётом горения в режиме искривлённого пламени, учитывающая возникновение турбулентности за счёт гидродинамических неустойчивостей.
5. Вычисляется интенсивность возникающей при горении белого карлика турбулентности и оценивается её влияние на ускорение фронта горения.

Научная новизна диссертационного исследования

В работе получены следующие новые результаты:

1. Разработан одномерный численный гидродинамический метод для расчёта структуры горения в условиях сверхновой типа Ia, учитывающий все необходимые физические процессы: лучистую и электронную теплопроводности, кинетику термоядерного горения. Данным методом рассчитана одномерная структура плоского фронта горения и получены характеристики нормального фронта: его скорость, толщина, перепад основных термодинамических величин.

2. Горение в SNIa исследовано на условия возникновения термопульсационной неустойчивости. Показано, что оно является устойчивым по отношению к этой неустойчивости.
3. Разработан трехмерный численный гидродинамический метод для расчёта задач гидродинамики горения. Этот метод позволяет рассчитывать распространение пламени как с учётом кинетики, так и с помощью метода слежения за фронтом горения (считая его бесконечно тонким). Рассчитана эволюция возмущений тонкого фронта при горении в канале.
4. Разработана модель турбулентности с учётом горения в режиме искривлённого пламени. В одномерных расчётах всей звезды получена интенсивность возникающей при горении белого карлика турбулентности. Оценено влияние турбулентности на скорость распространения горения и показано, что пламя ускоряется до $\sim 5\%$ от скорости звука.

Научная и практическая ценность работы

Полученные результаты будут использованы при построении моделей вспышек сверхновых типа Ia, позволяющих описывать распространение пламени на масштабах всей звезды. Свойства неустойчивостей горения составляют отдельную академическую задачу. Кроме того, они проявляются в различных условиях, в том числе и в земных экспериментах.

В ходе работы создан комплекс многомерных программ для решения задач гидродинамики, гидродинамики горения и исследования турбулентности. Применение этого комплекса не ограничено астрофизическими приложениями: он позволяет рассчитывать гидродинамические течения в различных условиях, горение газовых смесей, а также эксперименты по физике высоких плотностей энергии.

Методология и методы исследования

Основной метод исследования – построение аналитических и численных моделей гидродинамики горения. Также исследования опираются на чис-

ленные коды, созданные автором диссертации.

Положения, выносимые на защиту

1. Рассчитана одномерная структура плоского фронта горения. Получены характеристики нормального фронта: его скорость, толщина, перепад основных термодинамических величин.
2. Представлена упрощенная модель, показывающая основные свойства термопульсационной неустойчивости.
3. Показано, что горение в сверхновых является устойчивым по отношению к термопульсационной неустойчивости. Получены критические значения чисел Зельдовича, определяющие её развитие, для условий в сверхновой.
4. Рассчитана эволюция возмущений тонкого фронта при горении в канале. Вычислено возникающее увеличение скорости фронта.
5. Представлена модель турбулентности с учётом горения в режиме искривлённого пламени.
6. Рассчитана интенсивность возникающей при горении белого карлика турбулентности. Показано, что она приводит к ускорению пламени до $\sim 5\%$ от скорости звука.

Апробация результатов и публикации

Результаты, представленные в диссертации, докладывались и обсуждались на отечественных и международных конференциях – “11th Symposium on Nuclei in the Cosmos (NIC XI)” (Germany, Heidelberg, 2010), “Астрофизика высоких энергий сегодня и завтра” (Москва, ИКИ РАН, 2011), “XI международная конференция Забабахинские научные чтения” (Челябинская обл., Снежинск, 2012), “The 13th International Workshop on the Physics of Compressible Turbulent Mixing” (UK, Woburn, 2012), “Астрофизика высоких энергий сегодня и завтра” (Москва, ИКИ РАН, 2012), “Магнитоплазменные

процессы в релятивистской астрофизике” (Московская обл., Таруса, 2013), “Heavy elements nucleosynthesis and galactic chemical evolution” (Москва, ИТЭФ, 2013), “Аэрофизика и физическая механика классических и квантовых систем” (Москва, ИПМех РАН, 2013), “Астрофизика высоких энергий сегодня и завтра” (Москва, ИКИ РАН, 2013), а также на семинарах ИТЭФ.

По теме диссертационного исследования опубликовано пять статей в реферируемых журналах [1–5] и одна статья в трудах конференции [6].

Структура и объём диссертации

Диссертация состоит из введения, основной части, содержащей пять глав, и заключения. Общий объём диссертации составляет 107 страниц, включая 21 рисунок и 6 таблиц. Список литературы содержит 171 ссылку.

Содержание работы

Во **введении** обоснована актуальность выбранной темы, приведены общие характеристики диссертации, дан краткий обзор диссертационной работы, а также обзор мировой литературы по теме исследования.

В **главе 1** описываются общие свойства горения и два возможных режима стационарного горения: дефлаграционный (пламя) и детонационный. Выведена известная аналитическая оценка для скорости нормального пламени:

$$u_n = \left(\frac{\varkappa \dot{S}}{q} \right)^{1/2}, \quad (1)$$

где \varkappa – коэффициент температуропроводности, \dot{S} – скорость энерговыделения при горении, q – калорийность пламени.

Представлена аналитическая модель распространения горения по белому карлику. Модель получена при определённых упрощающих предположениях, основные из которых сферическая симметрия и мгновенный выход внешних (несгоревших) слоёв звезды на профили, соответствующие эмденновскому решению с $\gamma = 4/3$. В результате движение пламени (в зависимости от безразмерного времени ξ_1) может быть описано системой уравнений

$$dR = R \frac{\rho_1}{\rho_2} \frac{d\xi_1}{\xi_1}, \quad (2)$$

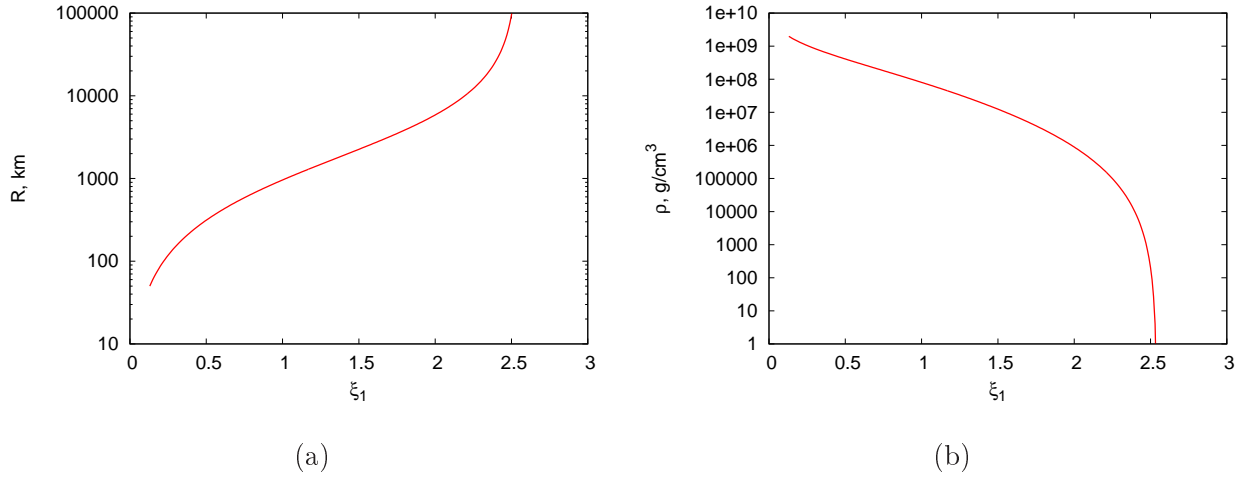


Рис. 1: Расчёт расширения белого карлика по аналитической модели

$$\rho_1 = \frac{K_2}{R^3} \xi_1^3 \theta(\xi_1)^n. \quad (3)$$

Здесь R – радиус сферического пламени, ρ_1 – плотность перед фронтом, ρ_1/ρ_2 – коэффициент расширения вещества после прогорания, K_2 – константа, $\theta(\xi)$ – безразмерная функция из эмденовского решения.

В результате решения системы с начальными условиями, близкими к реальным, получается зависимость $\rho_1(R)$. Результат представлен на рисунке 1. Видно, что плотность падает до “нуля” при конечном значении $\xi_1 \approx 2.5$, то есть в этой модели звезда прогорает не полностью: этому значению соответствует сгоревшая масса $M \approx 1.0M_\odot$ (конечно, в реальности горение остановится гораздо раньше при некоторой конечной плотности).

В конце главы представлены и обсуждаются известные механизмы перехода горения в детонацию.

В **главе 2** исследуются свойства плоского пламени при различных плотностях вещества в условиях белых карликов.

Представлена гидродинамическая модель с теплопроводностью и ядерными реакциями, в рамках которой проводятся расчёты структуры пламени.

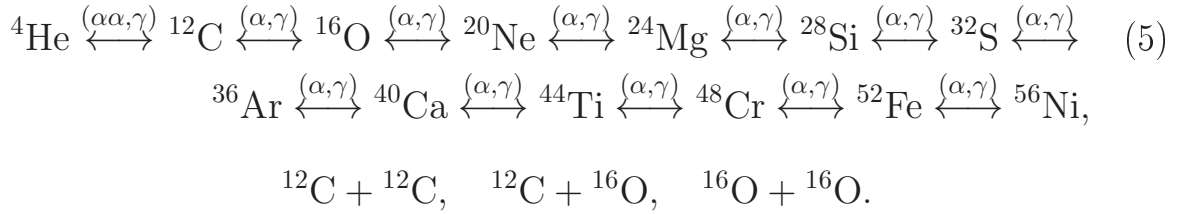
Для этой модели вычислена теплопроводность вырожденного релятивистского электронного газа, который существует при условиях взрыва сверхновых (впервые этот результат получен в работе Яковлева и Урпина (1980)):

$$\kappa_e = \frac{1}{36\pi} \frac{k_B^2 T (\mu^2 - m_e^2 c^4)^{5/2} v_F}{(\hbar c)^3 Z^2 e^4 n_i \mu \Lambda_{ei}}. \quad (4)$$

Здесь T – температура, μ – химпотенциал электронного газа, k_B – константа Больцмана, m_e – масса электрона, c – скорость света, v_F – скорость ферми электронов, Z – заряд ионов, e – заряд электрона, n_i – концентрация ионов, Λ_{ei} – кулоновский логарифм. представлены

Также в этой главе представлены уравнения состояния, используемые в расчётах: учитывается вклад излучения с температурой среды, ионов в виде идеального газа, вырожденных электронов с помощью метода, описанного в работе Надёжина и др. (1996) (этот метод позволяет с высокой точность вычислять Ферми–Дираковские интегралы и, тем самым, учитывать произвольную степень вырождения электронов); а также используемые сетки ядерных реакций:

- одноступенчатая реакция $^{12}\text{C} + ^{12}\text{C} \rightarrow ^{24}\text{Mg}^*$ (в которой можно моделировать горения до Ni путём повышения калорийности),
- альфа–цепочка, представленная в работе Тиммеса и др. (2000), реализованная Тиммесом в коде arghx13 (подключаемом к FRONT1D):



При условиях в которых происходил горение необходимо также учитывать электронное экранирование.

Вкратце описана используемая численная схема, которая реализована в собственном коде FRONT1D.

В результате расчётов распространения волны горения получены её основные характеристики для нескольких плотностей, результаты представлены в таблице 1. На рисунках 2 и 3 показаны примеры профилей различных величин для одного варианта. Результат скорости пламени для одностадийной реакции согласуется с аналитической формулой (1). Он показывает, что такая одностадийная реакция хотя и часто используется, не воспроизводит реальную скорость пламени. Полученные результаты находятся в согласии с работой Тиммеса и Вусли (1992), в которой также исследовались свойства плоского пламени в белом карлике.

Таблица 1: Результаты моделирования. ρ_0 – начальная плотность, “Calor.” – вариант сетки ядерных реакций (Mg, Ni – одноступенчатая реакция с калорийностью до Mg и Ni, соответственно), T_{\max} – температура сгоревшего вещества, ρ_u/ρ_b – коэффициент расширения, v_n – нормальная скорость пламени, Δx_{fr} – толщина фронта горения (определяемая по ширине области подъёма температуры).

Химсостав	ρ_0 , г/см ³	Calor.	T_{\max} , 10 ⁹ К	ρ_u/ρ_b	v_n , км/с	Δx_{fr} , см
¹² C	2×10^8	Mg	6.9	1.54	70.1	1.7×10^{-4}
		Ni	7.9	1.85	122	1.2×10^{-4}
		APROX13	6.8	1.60	18.2	3.0×10^{-4}
	7×10^8	Mg	9.1	1.33	302	1.8×10^{-5}
		Ni	10.7	1.57	470	1.5×10^{-5}
		APROX13	8.5	1.35	55.4	4×10^{-4}
	2×10^9	Mg	11.3	1.26	854	5.5×10^{-6}
		Ni	13.8	1.40	1241	1.0×10^{-5}
		APROX13	9.8	1.23	134	1×10^{-4}
¹⁶ O	2×10^8	APROX13	6.1	1.38	0.94	2×10^{-2}
	2×10^9	APROX13	8.8	1.17	22.1	5×10^{-4}

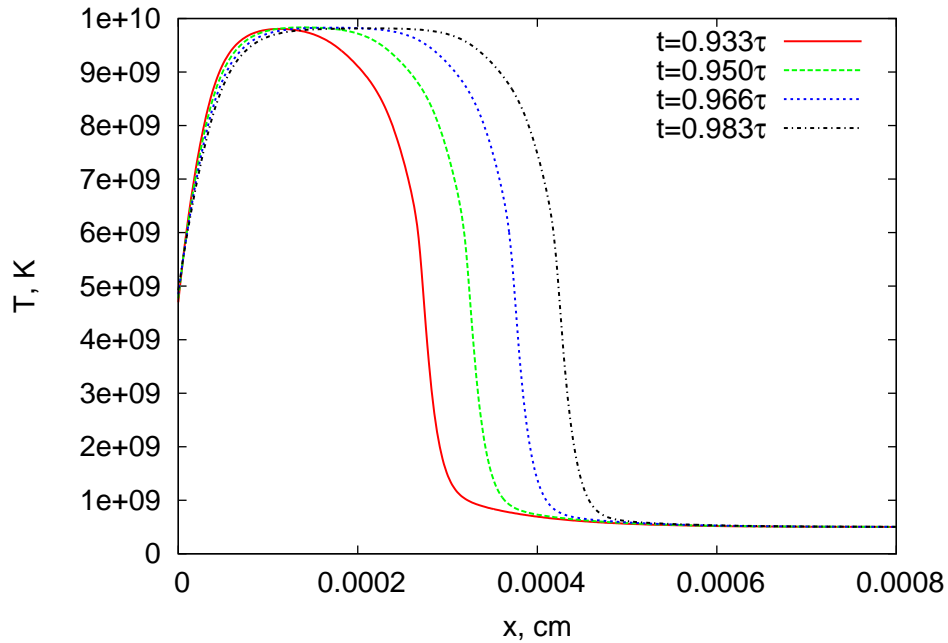


Рис. 2: Пример последовательных профилей температуры (на несколько моментов времени. Расчёт $\rho = 2 \times 10^9$ г/см³, начальный состав ¹²C, сетка реакций APROX13.

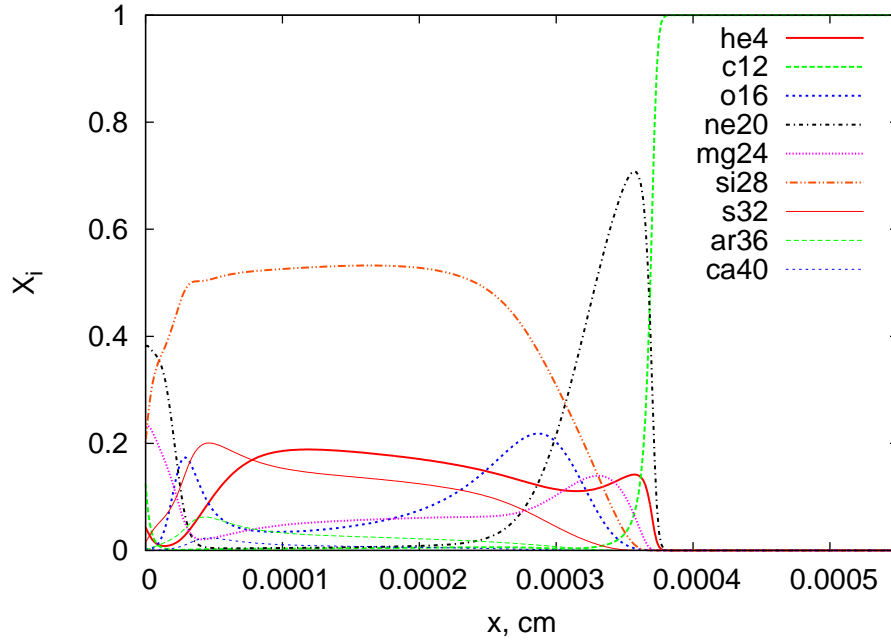


Рис. 3: Распределение концентраций различных элементов для расчёта с APROX13, $\rho = 2 \times 10^9$ г/см³, начальный химсостав ¹²C.

В **главе 3** исследуется устойчивость горения по отношению к термопультационной неустойчивости в условиях сверхновой.

Для этого вначале рассматривается упрощённая модель пульсаций (без гидродинамики, но с теплопроводностью и реакцией):

$$\partial_t T = \partial_x^2 T + \omega_0 c \Theta(T - T_0), \quad \partial_t c = -\omega_0 c \Theta(T - T_0), \quad (6)$$

здесь T – температура, c – концентрация недостающего реагента, ω_0 – параметр системы, задающий скорость горения (зависимость от температуры – тета-функция), $\omega_0 = T_0/(1 - T_0)$. Эта система уже обезразмерена таким образом, что концентрация меняется от 1 до 0, а температура возрастает, соответственно, с 0 до 1. Данная система может быть полностью решена и проанализирована аналитически: в системе есть решение, соответствующее стационарному пламени со скоростью $v = 1$. В результате анализа устойчивости по отношению к возмущениям вида $\exp(pt)$ получены три собственных значения для каждого ω_0 :

$$p \equiv \lambda^2 + \lambda, \quad (7)$$

$$\lambda_1 = -\frac{\sqrt{\omega_0^2 - 8\omega_0} + \omega_0}{4}, \quad \lambda_2 = \frac{\sqrt{\omega_0^2 - 8\omega_0} - \omega_0}{4}, \quad \lambda_3 = -1. \quad (8)$$

Третье собственное значение просто соответствует пространственному сдвигу. Численные значения действительной и мнимой части p для двух других

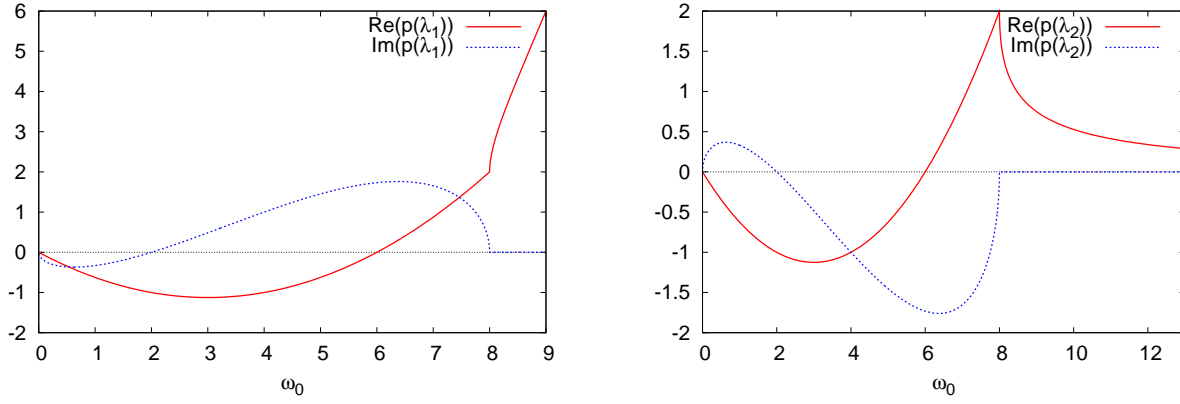


Рис. 4: Зависимости $p_1(\lambda_1(\omega_0))$ (слева) и $p_2(\lambda_2(\omega_0))$ (справа)

Таблица 2: Результаты расчётов при задании начальных условий из аналитического решения, ω_0 – параметр расчёта, Δx – размер счётной ячейки, v – измеренная в расчёте скорость, “comm.” – режим горения (“flame” – пламя с постоянной скоростью, “therm” – распадающееся пламя).

ω_0	Δx	v	comm.
1.0	0.05	1.000	flame
4.0	0.05	0.996	flame
5.5	0.02	1.006	flame
5.8	0.02	1.010	flame
6.0	0.01	1.019	flame
7.0	0.01	–	therm
8.0	0.01	–	therm
9.0	0.01	–	therm

вариантов показаны на рисунке 4. Видно, что система устойчива при $\omega_0 \leq 6$, неустойчива при $\omega_0 > 6$.

Данная система исследовалась численно с помощью численного кода FRONT1D. В результате было получено отличное согласие численных расчётов и теории. Например, для одного варианта задания начальных данных результаты представлены в таблице 2.

Так как скорость горения при $T < T_0$ строго обращается в ноль, данная система немного нефизична и поэтому в режиме неустойчивости пламя только распадается. Для получения пульсаций система была немного модифицирована:

$$\partial_t T = \partial_x^2 T + R(c, T), \quad \partial_t c = -R(c, T), \quad (9)$$

$$R(c, T) = \omega_0 c \Theta(T - T_0) + \omega_1 c \frac{T^2}{T_0^2} \Theta(T_0 - T) \Theta(T). \quad (10)$$

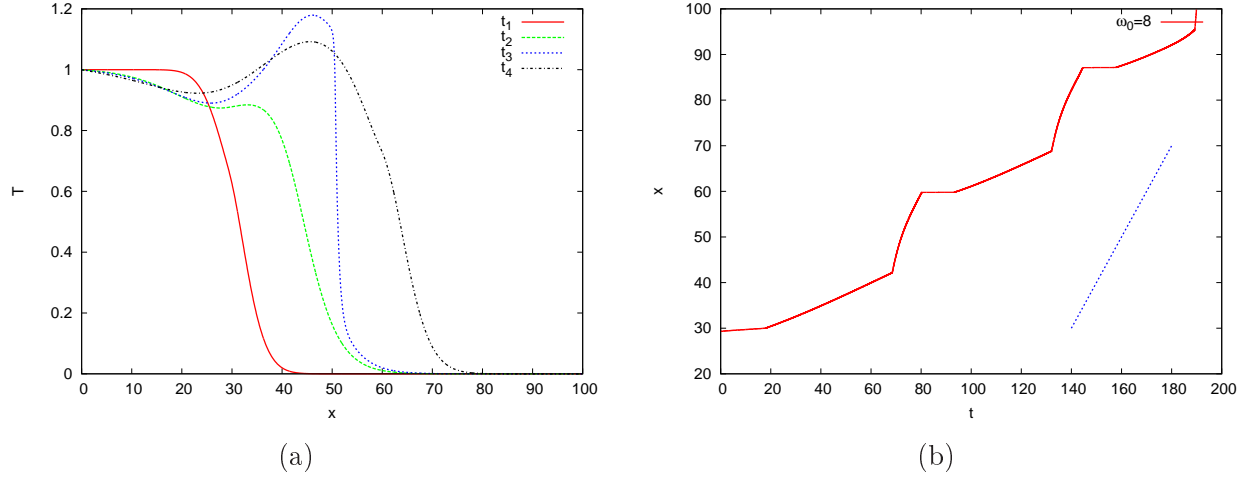


Рис. 5: Последовательные профили температуры для $t_1 < t_2 < t_3 < t_4$ (a) и координата фронта от времени $x(t)$ (b) для $\omega_0 = 8$ (пульсирующий режим пламени). Прямая линия на правом графике, нарисованная для примера, соответствует скорости $v = 1$

При условии $\omega_1 \ll \omega_0$ критерий устойчивости $\omega_0 < 6$ не меняется, а при $\omega_0 > 6$ возникает режим пульсирующего распространения пламени (см. рис. 5).

Во второй части главы исследуется устойчивость пламени в сверхновой. При условиях на число Льюиса $Le = \kappa/D \gg 1$ (κ – коэффициент температуропроводности, D – коэффициент диффузии), критерием возникновения пульсирующего режима является число Зельдовича

$$Ze = \left(\frac{\partial \ln \dot{S}}{\partial \ln T} \right)_{p, X_i} \Big|_{T_b}, \quad (11)$$

здесь \dot{S} – скорость энерговыделения, производная берётся при температуре прогоревшего вещества. Пульсационный режим возникает если $Ze > Ze_{cr}$. Никакие пульсации не наблюдались в предыдущих расчётах структуры горения (в главе 2). Проверить возможность их существования в данной системе можно попытавшись их вызвать – искусственно повысить число Зельдовича (горение в сверхновых соответствует $Ze \approx 2 - 5$). Для того, чтобы иметь возможность менять число Зельдовича была изменёна температурная зависимость скорости горения на закон Аррениуса:

$$R(T) = Ae^{-\mathcal{B}/T_9}. \quad (12)$$

Здесь T_9 – температура в единицах 10^9 К. В таком случае константа \mathcal{B} определяет число Зельдовича следующим образом

$$Ze_{Arren} = \frac{\mathcal{B}}{T_{9 \text{ burned}}}, \quad (13)$$

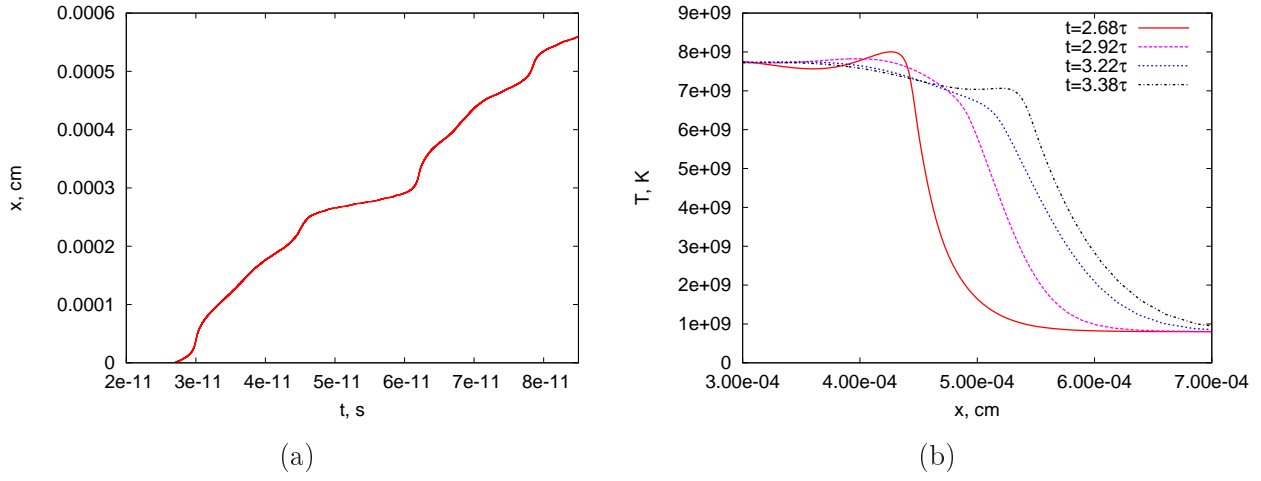


Рис. 6: Зависимость $x(t)$ (a) и профили температуры на несколько моментов времени (b) для пульсационного режима распространения пламени с искусственно увеличенным числом Зельдовича, $\rho = 2 \times 10^9$ г/см³, $\mathcal{B} = 112.5$, $q = 2.4 \times 10^{17}$ эрг/г

Таблица 3: Критические числа Зельдовича для условий сверхновой при различных плотностях.

ρ , г/см ³	Ze_{cr}
2×10^8	$18.4 < Ze < 20.4$
7×10^8	$14.6 < Ze < 15.6$
2×10^9	$13.5 < Ze < 13.9$

В результате, при определённых \mathcal{B} был получен пульсирующий режим пламени, аналогичный упрощенной модели, смотри рисунок 6. Из полученных результатов найдены критические числа Зельдовича для различных плотностей – см. таблицу 3. И, тем самым, показана устойчивость горения в SNIa.

В главе 4 рассмотрена неустойчивость Ландау–Даррье и численно решена задача о её развитии в канале.

Это неустойчивость тонкого фронта, на линейной стадии которой экспоненциально растут все возмущения, на нелинейной происходит стабилизация за счёт эффекта Маркштейна, либо в структурах, когда образуются угловые точки – каспы (в определённой степени эти эффекты связаны).

Для численного исследования такой неустойчивости необходим многомерный код с возможностью считать пламя бесконечно тонким. Использовать подход как в главе 2 невозможно, так как необходимо будет разрешать как толщину пламени, так и масштабы значительно её превыша-

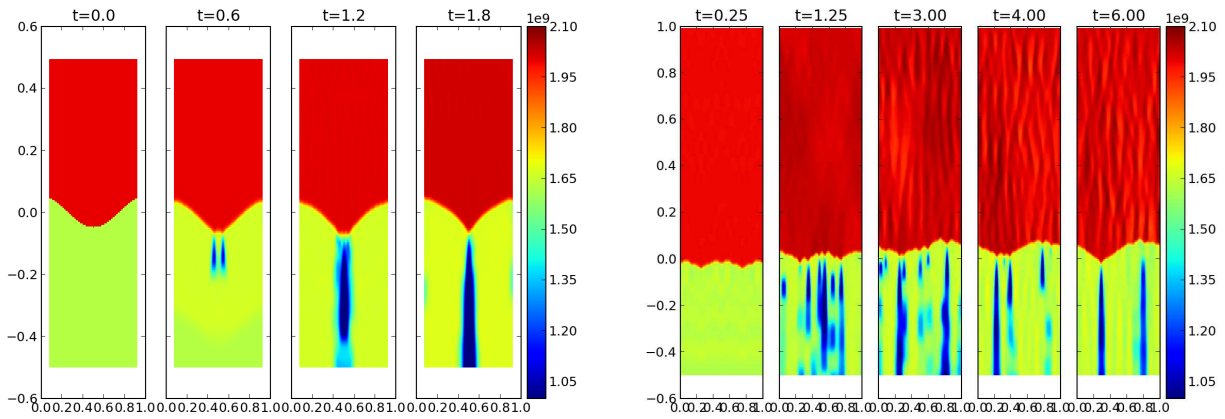


Рис. 7: Распределение плотности на разные моменты времени для двух расчётов: одномодовое возмущение (слева), многомодовое возмущение (справа). Время в единицах 10^{-8} с

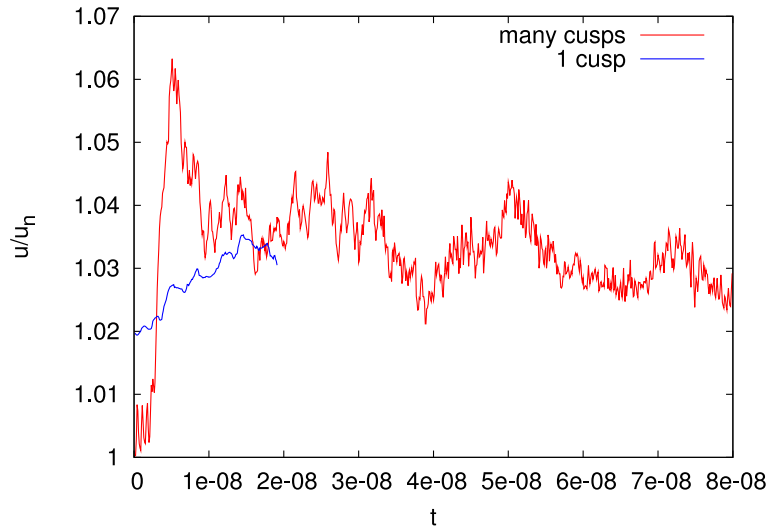


Рис. 8: Скорость пламени относительно набегающего вещества, полученная в расчёте, в зависимости от времени

ющие. Для решения задачи был создан код FRONT3D, в котором реализована трёхмерная гидродинамика и метод уровней (level-set) для слежения за фронтом. Была использована реализация метода уровней, предложенная в работе Рейнеке и др. (1999). С помощью этого кода была посчитана эволюция возмущений при течении в канале (с периодическими граничными условиями) – см. рис. 7. Во всех случаях – с одномодовым и многомодовым возмущением, образовывалась структура с одним каспом. При этом скорость пламени возрастала на 3–4% (см. рис. 8).

В главе 5 рассматривается вопрос о генерации турбулентности и её взаимодействии с пламенем. Турбулентность является сложным и не изучен-

ным до конца явлением. Сложность в первую очередь связана с нелинейным взаимодействием волн из очень широкого диапазона волновых векторов. Это не позволяет промоделировать данную систему целиком. В результате в реальных задачах используются различные модели. В данной главе такая модель для турбулентного горения в режиме искривлённого пламени (flamelet) строится на основе k - ϵ модели. Этот подход отличается от используемых для расчётов SNIa моделей Шмидта (Шмидт и др. 2006), основанной на методе больших вихрей (LES), и линейного вихря “LEM” (Вусли и др. (2009)). Преимущества предложенной модели заключаются в возможности проводить расчёты в меньших размерностях (например, 1D), при этом корректно воспроизводя трёхмерные свойства турбулентности. Это позволит проводить относительно дешёвые расчёты взрыва сверхновых (что невозможно, например, с помощью модели Шмидта). Подобная этой, k - ϵ модель была использована в работе Грязных и др. (2007) для расчёта термоядерного горения на поверхности нейтронных звёзд.

Эта модель реализована в коде FRONT3D. С помощью неё были проведены расчёты самосогласованного горения в белом карлике в сферически-симметричном приближении (пример распределения плотности на несколько моментов времени для одного расчёта представлено на рисунке 9). Под самосогласованностью понимается как учёт генерации турбулентности пламенем за счёт развития неустойчивости Рэлея–Тейлора–Ландау, эволюции этой турбулентности и её обратное влияние на пламя. В результате в расчётах получено увеличение скорости пламени за счёт турбулентности: во всех вариантах при различных калорийностях и начальном химсоставе конечная скорость получается (200 – 300) км/с, или (3 – 7)% скорости звука (см. рисунок 10). Эти результаты согласуются с подобными расчётами других групп, см. например Репке (2007). Полученное ускорение пламени недостаточно для перехода в детонацию, что отчасти подтверждает предположение, высказанное в работах других авторов, что переход происходит не во всём пламени целиком, а в редких высокоскоростных турбулентных пульсациях.

В заключении подведены итоги работы и ещё раз кратко сформулированы основные результаты.

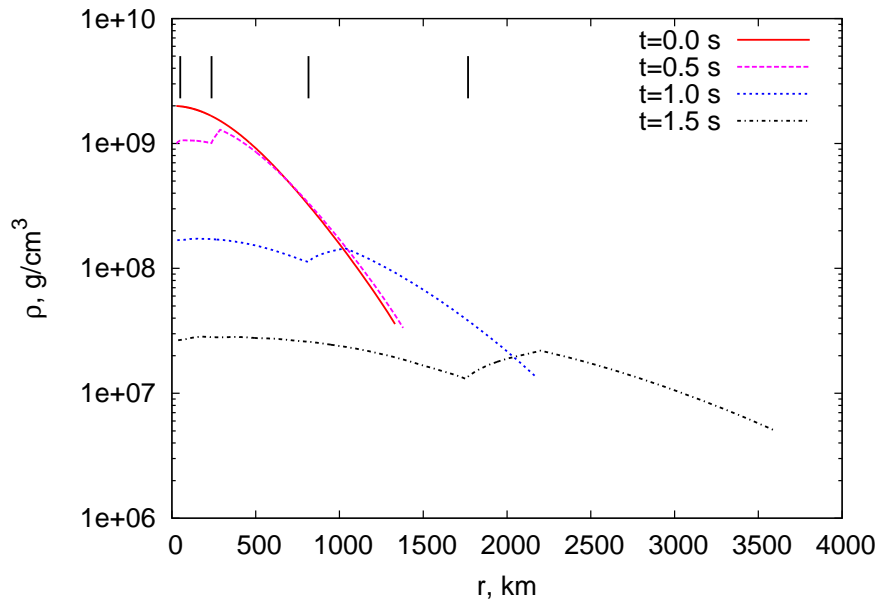


Рис. 9: Профили плотности на разные моменты времени, вариант с калорийностью $q = 9.2 \times 10^{17}$ эрг/г, начальный химсостав ^{12}C . Вертикальные риски показывают положения фронта горения на соответствующие моменты времени

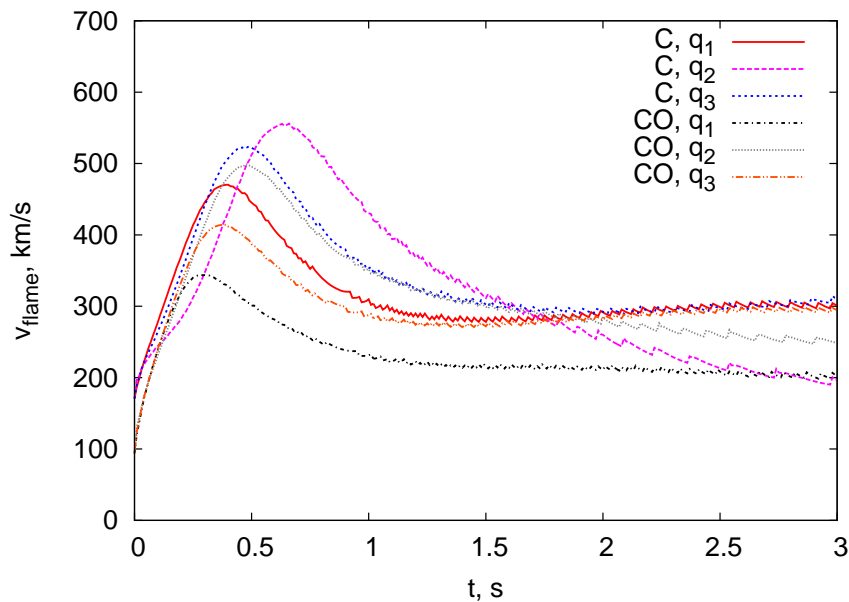


Рис. 10: Скорости пламени для всех вариантов, с разным химсоставом (C или $0.5\text{C}+0.5\text{O}$) и калорийностями $q_{1,2,3} = 5.6 \times 10^{17}, 9.2 \times 10^{17}, 7.0 \times 10^{17}$ эрг/г

Публикации автора по теме диссертации

- [1] Glazyrin S. I., Blinnikov S. I. Coulomb corrections and thermo-conductivity of a dense plasma // Journal of Physics A Mathematical General. 2010. Vol. 43. p. 075501.
- [2] Glazyrin S. I., Sasorov P. V. Simple model of propagating flame pulsations // MNRAS. 2011. Vol. 416. P. 2090–2095.
- [3] Glazyrin S. I., Blinnikov S. I., Dolgov A. Flame fronts in Type Ia supernovae and their pulsational stability // MNRAS. 2013. Vol. 433. P. 2840–2849.
- [4] Глазырин С. И. Исследование горения в сверхновых типа Ia // Письма в астрономический журнал. 2013. Т. 39. С. 249–254.
- [5] Glazyrin S. I. Turbulence model for simulation of the flame front propagation in SNIa // Astrophysics and Space Science. 2014. Vol. 350. P. 683–689.
- [6] Glazyrin S., Blinnikov S. Properties of nuclear flame in presupernova white dwarf // in proceedings of the conference “Nuclei in the Cosmos”, published online id. 250. 2010. URL: <http://pos.sissa.it/cgi-bin/reader/conf.cgi?confid=100>.