

Московский государственный университет
имени М.В. Ломоносова

Механико-математический факультет

На правах рукописи

Тагирова Рената Рифовна

КУМУЛЯЦИЯ МАССЫ ПЛОТНЫХ ГАЗОВЫХ
СЛОЕВ ПРИ ИХ УСКОРЕНИИ В НОРМАЛЬНОМ
НАПРАВЛЕНИИ

01.02.05 — Механика жидкости, газа и плазмы

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Москва — 2009

Работа выполнена на кафедре аэромеханики и газовой динамики Механико-математического факультета Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова и в лаборатории теоретического моделирования Института космических исследований Российской академии наук

Научный руководитель: доктор физико-математических наук,
профессор К.В. Краснобаев

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук,
профессор А.Н. Голубятников
кандидат физико-математических наук
М. К. Ермаков

Ведущая организация: Московский физико-технический институт,
факультет аэрофизики и космических
исследований

Защита диссертации состоится 18 декабря 2009 г. в 15 часов на заседании диссертационного совета Д.501.001.89 при Московском государственном университете имени М.В. Ломоносова по адресу: Российская Федерация, 119991, ГСП-1, Москва, Ленинские горы, Главное здание МГУ, Механико-математический факультет, аудитория 16-24.

С диссертацией можно ознакомиться в Научной библиотеке Механико-математического факультета МГУ им. М.В. Ломоносова.

Автореферат разослан _ ноября 2009 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета Д.501.001.89
доктор физико-математических наук

А.Н. Осипцов

Общая характеристика работы

Актуальность темы

В настоящее время значительный интерес представляет исследование ускоренного движения деформированных тонких слоев плотного вещества. Ускорение может быть обусловлено как разностью давлений с обеих сторон слоя, так и воздействием ударных волн на границу слоя.

В работах А.Н. Голубятникова, С.И. Зоненко и Г.Г. Черного¹ было установлено, что если свойства среды таковы, что имеется максимум инкремента нарастания возмущений, то могут возникать достаточно регулярные “пальцеобразные” структуры, обладающие свойством накопления массы и импульса вещества слоя. Данные эффекты, являющиеся одним из проявлений неустойчивости Рэлея–Тейлора, находят широкое применение не только в технических устройствах, основанных на взрывном метании металлических оболочек, но и при решении фундаментальных научных проблем.

Так, вопрос кумуляции массы газа актуален в задачах космической газовой динамики, поскольку ускоренные движения плотных слоев наблюдаются во многих астрофизических объектах. Примером служат плотные газовые оболочки, окружающие горячие звезды и расширяющиеся под действием нагретого излучением звезды газа. Для оболочек характерно присутствие в них значительных неоднородностей плотности.

Часто неоднородности представляют собой достаточно регулярные радиально ориентированные уплотнения с массами порядка масс звезд и планет. Исследование происхождения такой структуры уплотнений является необходимым этапом анализа фундаментальных процессов звездообразования.

Для многих астрофизических приложений представляет интерес также исследование кумуляции массы при ускорении плотной среды падающей на ее границу сильной излучающей ударной волны. При этом возникает неустойчивость Рихтмайера–Мешкова^{2,3}, а областью накопления массы является слой газа, сжатого прошедшей через разрыв ударной волной.

В космических условиях анализ влияния неустойчивости Рихтмайера–

¹Голубятников А.Н., Зоненко С.И., Черный Г.Г. Новые модели и задачи теории кумуляции. Успехи механики. 2005. Т.3. №1. С.31-93.

²Richtmyer R.D. Taylor instability in shock acceleration of compressible fluids. Commun. Pure and Appl. Math. 1960. V.13. №2. P.297-319.

³Мешков Е.Е. Неустойчивость границы раздела двух газов, ускоряемой ударной волной. Изв. АН СССР. МЖГ. 1969. №5. С.151-158.

Мешкова на морфологию среды необходим при изучении явлений нестационарного истечения звездного ветра и распространения сильных ударных волн от вспышек сверхновых звезд в неоднородном газе.

Актуальность представленных в работе исследований обусловлена резко возросшим уровнем техники наблюдений космических явлений, который позволяет сопоставлять данные наблюдений с результатами расчетов.

Цели работы

1. Развитие теории ускоренного движения тонких деформированных оболочек на случай газовых слоев с учетом сжимаемости среды, конечных значений толщины слоя и отношения плотностей в слое и в окружающем его газе.
2. Установление критериев формирования достаточно регулярных “пальцеобразных” уплотнений с эффектами кумуляции массы и с высокой дисперсией скоростей, предсказываемых инерционной моделью. Анализ структуры течений в деформированном слое.
3. Исследование условий, при которых неоднородная структура излучающей среды определяется развитием неустойчивости Рихтмайера–Мешкова. Анализ влияния процессов радиационного охлаждения на форму и на суммарную массу возникающих уплотнений.
4. Выявление морфологических отличий уплотнений, образующихся под действием разности давлений с обеих сторон слоя (постепенный режим ускорения) и под воздействием ударных волн на границу слоя (импульсный режим ускорения).

Научная новизна

1. Выполнены расчеты эволюции двумерных плоских адиабатических возмущений тонкого газового слоя, ускоренно движущегося под действием разности давлений с обеих его сторон, и найдены критерии возникновения “пальцеобразных” уплотнений. Количественно определены эффекты накопления массы.
2. Исследована структура течений при слиянии частей деформированного слоя. Найдено присутствие комплекса ударных волн. Их конфигурация зависит от времени и на разных стадиях

эволюции возмущений слоя может иметь место как пересечение ударных волн, так и его отсутствие.

3. Проведен сравнительный анализ влияния импульсного и постепенного режимов ускорения на движение тангенциального разрыва и на эффекты накопления массы в областях плотного газа, образующихся при развитии возмущений разрыва.
4. Развита методика двумерных расчетов проявления неустойчивости Рихтмайера–Мешкова с учетом процессов радиационного охлаждения. Выявлена значительная роль функции охлаждения в распределении плотности газа за ударной волной.
5. Установлено, что процессы радиационного охлаждения не влияют существенно на скорость роста начальных возмущений и на суммарную массу образующихся уплотнений, но значительно увеличивают плотность сжатого ударной волной газа и уменьшают вклад длинноволновых возмущений в деформации поверхности тангенциального разрыва.

Достоверность результатов

Достоверность полученных результатов обусловлена применением фундаментальных уравнений газовой динамики при построении математических моделей; точностью численных методов, основанных на использовании апробированной разностной схемы, успешно применявшейся ранее при исследовании течений с разрывами; хорошим совпадением расчетов с известными в литературе частными случаями, в том числе с аналитическими решениями автомодельных задач газовой динамики; качественным соответствием результатов с данными космических наблюдений.

Научная и практическая значимость

Научная ценность работы состоит в возможности применения полученных результатов к решению фундаментальных вопросов космической газовой динамики, а также к задачам лабораторного моделирования воздействия высокоэнергичного излучения на вещество. Автором диссертации развита теория деформаций тонких плотных слоев на случай движения околозвездных оболочек. На примерах развития возмущений в звездном

ветре и при взаимодействии ударной волны от сверхновой звезды с неоднородной межзвездной средой определено влияние радиационного охлаждения на характеристики движения образующихся уплотнений.

Предложенные в работе численные модели течений, учитывающие физические свойства среды и режимы ускорения, могут быть использованы для усовершенствования газодинамических теорий развития нелинейных возмущений поверхности тангенциального разрыва. Практическая значимость работы определяется возможностью использования результатов при планировании экспериментов в космосе, при анализе полученных с помощью космических аппаратов данных, а также в лабораторных исследованиях по созданию условий, наблюдаемых в остатках сверхновых звезд.

Апробация работы

Основные положения и результаты, вошедшие в диссертацию, докладывались и обсуждались на семинарах кафедры аэромеханики и газовой динамики (МГУ, Москва); на семинарах лаборатории теоретического моделирования (ИКИ РАН, Москва); на семинаре кафедры волновой и газовой динамики (МГУ, Москва).

Результаты, представленные в диссертации, докладывались автором на следующих 11 научных конференциях: конференциях “Ломоносовские чтения” (МГУ, Москва, 2006, 2007); конференциях молодых ученых “Фундаментальные и прикладные космические исследования” ИКИ РАН (Москва, 2007-2009); XV школы–семинаре «Современные проблемы аэрогидродинамики» (Сочи, 2007); конференции–конкурсе молодых ученых НИИ механики МГУ (Москва, 2007); XXXII Академических чтениях по космонавтике (МГТУ им. Н.Э.Баумана, Москва, 2008); XV Международной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых “Ломоносов” (МГУ, Москва, 2008); Всероссийской конференции “Астрофизика высоких энергий сегодня и завтра” (ИКИ РАН, Москва, 2008); Всероссийском конкурсе инновационных проектов “У.М.Н.И.К.”(МГУ, Москва, 2008).

В соавторстве с К.В.Краснобаевым и Г.Ю.Котовой за циклы работ “Моделирование кумулятивных эффектов при ускоренном движении плотных газовых оболочек” и “Развитие моделей формирования неоднородностей структуры плотных газовых оболочек в космических условиях” автор удостоен премии в номинации “Лучшая научная работа

Института” по результатам конкурсов ИКИ РАН в 2007 и 2008 гг.

Публикации

Основные результаты диссертационной работы изложены в 16-ти печатных работах, 3 из них опубликованы в журналах, которые входят в перечень ВАК. Список работ приведен в конце автореферата.

Структура и объем диссертации

Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения и списка литературы (114 наименований). Общий объем диссертации 134 страниц.

Краткое содержание работы

Во введении представлен краткий обзор литературы по теме диссертации, обоснована актуальность темы работы, указана цель и новизна исследований, отмечена их практическая ценность.

В первой главе формулируется система уравнений, описывающих двумерные плоские неустановившиеся движения идеальной сжимаемой среды. В **разделе 1.1** обсуждается модель среды и вид уравнений для случая движения с учетом потерь энергии среды на высвечивание; рассматривается метод приведения уравнений к безразмерному виду.

В общем случае используется одножидкостная модель идеальной многокомпонентной среды. Среда является смесью совершенных газов с показателем адиабаты $\gamma = 5/3$. Скорости и температуры T всех компонент считаются одинаковыми. Концентрация и масса атомов i -го сорта далее обозначены соответственно через n_i и m_i .

Уравнения неразрывности, движения, притока тепла и уравнение состояния имеют вид

$$\frac{d\rho}{dt} + \rho \operatorname{div} \mathbf{v} = 0, \quad \rho \frac{d\mathbf{v}}{dt} + \operatorname{grad} p = 0,$$
$$\rho \frac{d}{dt} \left(\frac{1}{\gamma - 1} \frac{p}{\rho} \right) + p \operatorname{div} \mathbf{v} = -\Phi(n_i, T), \quad p = \sum_i n_i k T, \quad \rho = \sum_i m_i n_i$$

Плотность ρ , давление p и скорость $\mathbf{v}$ определены как функции пространственных декартовых координат (x, y) и времени t . Величина

k – постоянная Больцмана. Функция $\Phi(n_i, T)$ – это количество энергии, теряемой путем излучения единицей объема среды в единицу времени. Величина $\Phi(n_i, T) \sim \rho^2 \Lambda(T)$, где вид эффективности охлаждения $\Lambda(T)$ известен и рассмотрен в работах М. Кафатоса и С. Фалле.

Система уравнений решается численным методом сквозного счета, основанным на монотонной разностной схеме типа TVD второго порядка аппроксимации. В **разделе 1.2** описан этот метод и рассмотрены примеры тестовых расчетов.

Вторая глава посвящена исследованию развития двумерных адиабатических деформаций плотного слоя газа, ускоряемого под действием разности давлений с обеих его сторон. В **разделе 2.1** дан краткий обзор основных приближенных теорий. Рассматривается построенная Г.Г. Черным с соавторами¹ инерционная модель устойчивости ускоренно движущихся тонких плотных оболочек, предсказывающая образование “пальцеобразных” уплотнений и эффектов кумуляции массы и импульса. Представлены приближенные теории столкновения двух симметричных плоских потоков вещества, описывающие условия возникновения ударных волн в потоках и критерии существования кумулятивных струй. Изложение теорий основано на результатах работ М.А. Лаврентьева, Э. Отта, а также на материалах монографии по физике взрыва под редакцией Л.П. Орленко. Отмеченные теории используются в дальнейшем для интерпретации расчетных данных.

В **разделе 2.2** моделируется невозмущенное движение плоского слоя для того, чтобы найти поле течения, которое затем в двумерной постановке принимается за основное. Рассматривается ускорение первоначально покоившегося (то есть $\mathbf{v} = 0$ при $t = 0$) плоского слоя газа. Начальные условия имеют вид

$$x < x_c : \rho = \rho_0 = \text{const}, p = p_0 = \text{const}$$

$$x_c \leq x_1 \leq x_c + \delta_0 : \rho = \rho_1 = \text{const}, p = p_1 = \text{const}$$

$$x > x_c + \delta_0 : \rho = \rho_2 = \text{const}, p = p_2 = \text{const}$$

Здесь $p_1 = p_0$ и, следовательно, x_c – координата тангенциального разрыва. Значению $x = x_c + \delta_0$, где $\delta_0 = \text{const}$ – начальная толщина слоя, отвечает положение произвольного разрыва с $p_2 < p_1$. Будем считать, что ρ_0 и ρ_2 значительно меньше ρ_1 , то есть слой (область “1”) достаточно плотный. В таком случае область “0” занята горячим газом сравнительно малой плотности, а температура в области “2” невелика. Анализ основных особенностей решения удобно проводить, вводя некоторый характерный масштаб течения $\mathcal{L}$ и выражая пространственные переменные, а также

время, плотность, скорость и давление соответственно в единицах $\mathcal{L}$, $\mathcal{L}/c_0$ ($c_0 = \sqrt{p_0/\rho_0}$), ρ_0 , c_0 , p_0 .

По результатам одномерного моделирования оцениваются такие характеристики течения, как плотность и скорость газа в слое и их изменение со временем, величина ускорения, присутствие волн различных типов. Показано, что момент времени, когда весь слой ускорится и произойдет смещение тангенциального разрыва с начальной координатой x_c , определяется в основном толщиной слоя и температурой газа в нем.

Раздел 2.3 посвящен численному исследованию роста двумерных длинноволновых возмущений плотного газового слоя. Вид возмущений задается близким к тем, эволюция которых уже анализировалась в рамках приближенного подхода¹. Согласно этому подходу уплотнения достаточно регулярной структуры могут возникать, если имеется диапазон длин волн вне которого возмущения не нарастают. Применительно к движению околозвездных оболочек длины волн ограничены снизу из-за влияния диссипативных процессов, а сверху вследствие эффектов поглощения излучения горячим газом. Рассматриваются начальные гармонические возмущения скоростей частиц слоя.

Для исследования влияния свойств среды проведены вычисления в широком диапазоне изменения плотности слоя. Типичными являются результаты расчетов с начальными величинами $\delta_0 = 0.25$, $\rho_0 = 1$, $p_0 = 1$, $p_2/p_0 = 0.02$ для достаточно плотного слоя с условиями (i) – $\rho_1/\rho_0 = 50$, $\rho_2/\rho_0 = 1$ и для слоя меньшей плотности (ii) – $\rho_1/\rho_0 = 5$, $\rho_2/\rho_0 = 0.1$. Начальная амплитуда возмущений и длина волны равны $A_0 = -0.1$ и $\lambda = 5$.

Об основных особенностях развития двумерных деформаций дает представление рис.1. Уплотнения со значительно различающимися в продольном и в поперечном направлениях масштабами формируются при начальной плотности слоя существенно (более чем на порядок) превышающей плотность окружающей среды, то есть с условиями (i).

Количественные эффекты кумуляции массы характеризуем интегральной величиной $m_e = (M_S - M_S^*)/M_e^*$, где

$$M_S(y, t) = \int_{x_0}^{x_n} \rho(x, y, t) dx, \quad M_S^*(0) = \int_{x_0}^{x_n} \rho(x, 0, 0) dx, \quad M_e^*(0) = \int_{x_c}^{x_c + \delta_0} \rho(x, 0, 0) dx.$$

Здесь x_0 , x_n – координаты, ограничивающие расчетную область.

Графики m_e на рис.1 показывают, что кумуляция массы в слое происходит, если плотность газа в нем существенно превышает плотность ускоряющего слой горячего газа. Как и предсказывается инерционной теорией, возникающие уплотнения содержат около половины

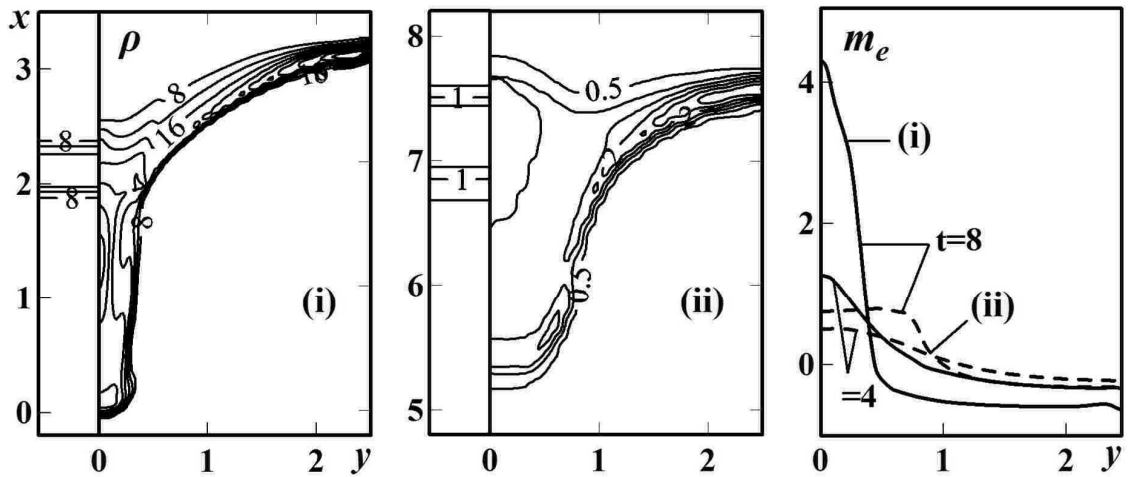


Рис. 1. Линии уровня плотности для $t = 8$ при условиях (i) и (ii), на каждом графике изохор слева одномерные расчеты ($A_0 = 0$), справа - двумерные. Интегральные массы $m_e(y)$ при $t = 4, 8$ для (i) - сплошные линии и (ii) - штриховые кривые.

первоначальной массы, а области концентрации массы являются достаточно узкими и имеют размер на порядок меньше, чем длина волны возмущений.

Для объяснения выявленных отличий проводится анализ течений газа в слое. Согласно инерционным теориям на нелинейной стадии эволюции возмущений происходит столкновение соседних частей слоя. Качественное описание дальнейшего поведения потоков дают приближенные модели (Э.Отт, Л.П.Орленко). Предполагается, что потоки имеют одинаковые постоянные скорости и возможно выделить точку столкновения потоков. Движения относительно системы отсчета, связанной с этой точкой, могут быть разделены на два типа.

Первый тип реализуется в случае, когда скорости потоков дозвуковые. Для таких движений характерно образование в области слияния как опускающихся “вниз”, так и поднимающихся “вверх” частей уплотнений (Г.Биркгоф и др., М.А.Лаврентьев). Качественно такая картина течения согласуется с расчетами при $\rho_1/\rho_0 = 5$ (рис.1, (ii)), что объясняется существенно большей, чем для $\rho_1/\rho_0 = 50$, скоростью звука в слое.

Второй тип движений соответствует сверхзвуковым потокам и характеризуется возникновением ударных волн в слое (Дж.Уолш и др.). В зависимости от параметров среды возможны режимы как пересечения ударных волн на оси слияния потоков ($y = 0$), так и его отсутствия (Л.П.Орленко). Появление ударных волн иллюстрирует рис.2(а,б) для плотного слоя, удовлетворяющего условиям (i). Слева на графиках (а) и (б) показаны сплошными линиями изобары, а штриховыми - положение

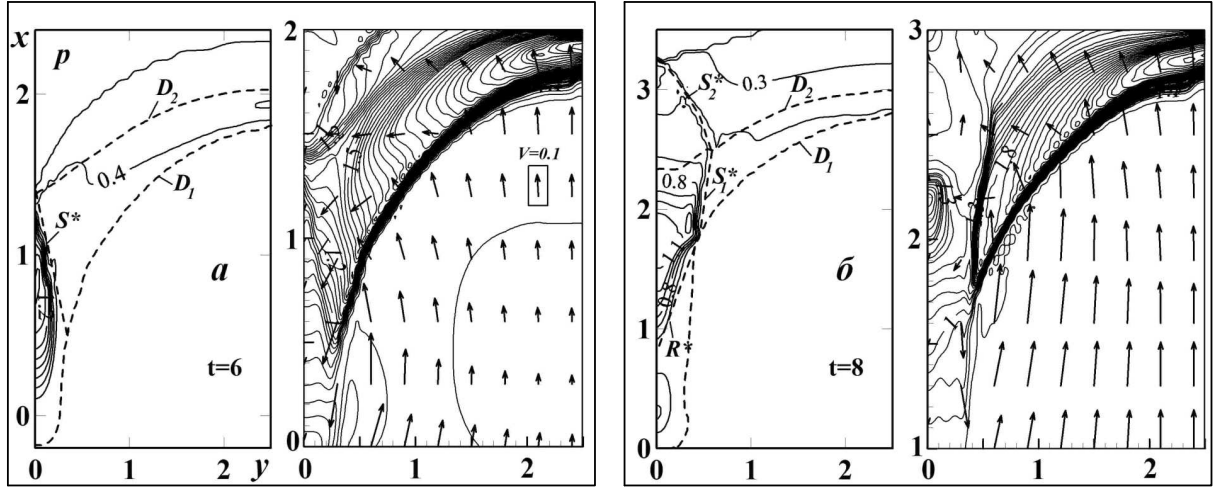


Рис. 2. Для каждого графика *а* ($t=6$) и *б* ($t=8$): линии уровня давления (слева) и числа Маха с векторами относительных скоростей (справа). Условия (i): $\rho_1/\rho_0 = 50$, $\rho_2/\rho_0 = 1$.

слоя, ограниченного тангенциальными разрывами D_1 и D_2 , и положения возникающих поверхностей разрывов (S^* , S_1^* , S_2^* , R^*). Справа от изобар изображены числа Маха, вычисленные для абсолютных скоростей $\mathbf{v}$, и векторы относительных скоростей газа, рассмотренные в системе координат, связанной с движением невозмущенного тангенциального разрыва D_1 . Возникающие при столкновении потоков области с резкими изменениями параметров газа (S^* , S_1^* , S_2^*) являются скачками уплотнения, что было установлено путем анализа соотношений Рэнкина-Гюгонио. Взаимодействие ударной волны с тангенциальным разрывом D_1 должно сопровождаться появлением волны разрежения R^* , что и показывают расчеты (изобары при $t = 8$).

На начальной стадии слияния частей слоя проекции скоростей $\mathbf{v}$ на ось y вблизи линии $y = 0$ малы и набегающие потоки почти параллельны оси x . Это влечет образование пересекающихся ударных волн S^* (рис. 2а). Однако по мере нарастания деформаций слоя угол между сталкивающимися частями увеличивается и возможен режим отхода ударных фронтов S_1^* в сторону набегающих потоков (рис. 2б). В целом результаты численного моделирования показывают, что конфигурация волн сложнее, чем это предсказывается приближенными теориями.

В третьей главе рассматриваются и сопоставляются два режима ускорения тангенциального разрыва, приводящих к нарастанию адиабатических двумерных возмущений. Первый тип движения отвечает импульсному ускорению границы плотного вещества под действием ударной волны. Второй тип движения, исследовавшийся в предыдущей

главе, соответствует постепенному ускорению плотного слоя вследствие разности давлений с обеих его сторон (тангенциальный разрыв отделяет горячий газ от более плотного холодного). Только теперь в качестве начальных условий задаются возмущения формы поверхности слоя, что соответствует начальным данным, обычно используемым при рассмотрении неустойчивости Рихтмайера–Мешкова. Цель численного моделирования заключается в исследовании морфологических отличий уплотнений, образующихся при импульсном и при постепенном режимах ускорения плотного газа.

Рассматриваемые в этой главе движения основаны на представлениях о развитии неустойчивостей Рэлей–Тейлора и Рихтмайера–Мешкова. Поэтому в **разделе 3.1** излагаются основополагающие результаты теорий Тейлора⁴ и Рихтмайера², а также экспериментов Е.Е. Мешкова³. Дается краткий обзор современных направлений исследования неустойчивостей данного типа и физических аспектов теории, обсуждаемых в монографиях А.Ю. Демьянова, Н.А. Иногамова и Э.И. Соны^{5,6}.

В **разделе 3.2** на основе условий, близких к рассмотренным Е.Е. Мешковым, проводятся расчеты нарастания деформаций тангенциального разрыва при его ускорении плоской ударной волной. Целью расчетов является обоснование применимости используемого в работе численного метода к моделированию неустойчивости Рихтмайера–Мешкова. Рассматриваются движения, когда импульсному ускорению подвергается газ большей плотности. В этом случае после взаимодействия ударной волны с первоначально покоящимся тангенциальным разрывом возникают ударные волны: преломленная, распространяющаяся вперед в плотную среду, и отраженная, движущаяся в обратном направлении по менее плотному газу. Получено близкое количественное согласование вычислений с экспериментальными данными.

Раздел 3.3 посвящен анализу влияния импульсного и постепенного режима ускорения плотного газа на характеристики движения деформированного тангенциального разрыва и на эффекты кумуляции массы. Моделирование двух типов ускоренного движения тангенциального разрыва D проведено в условиях, близких к реализованным в

⁴Taylor J. The instability of liquid surfaces when accelerated in a direction perpendicular to their planes I. Proc. Roy Soc. London. Ser. A. 1950. V. 201. № 1065. P. 192-196.

⁵Иногамов Н.А., Демьянов А.Ю., Сон Э.И. Гидродинамика перемешивания: периодические структуры, усиление субгармоник, инверсный каскад. М.: Изд-во МФТИ, 1999. 464 с.

⁶Inogamov N.A. The Role of RT and RM Instabilities in Astrophysics: an Introduction. Astroph. and Space Phys. Rev. 1999. V. 10. pt. 2.

экспериментах Е.Е. Мешкова. Результаты расчетов представлены на рис. 3, где под расстоянием χ понимается тот путь, который проходит невозмущенный тангенциальный разрыв. Видно, что для границ D , прошедших один и тот же путь, амплитуды смещения A в случае постепенного ускорения (кривые 4, 5, 6) могут быть больше их значений при импульсном ускорении (1).

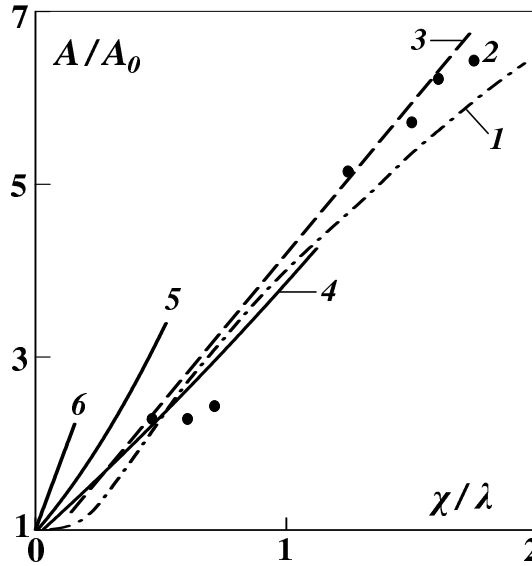


Рис. 3. Зависимость амплитуды смещения границы A/A_0 от пройденного пути χ/λ при импульсном ускорении границы (1 - численный расчет, 2 - эксперимент³, 3 - линейная интерполяция экспериментальных данных³) и при движении слоя толщины $\delta_0/\lambda = 0.075, 0.2, 0.5$ (линии 4, 5, 6).

Эффекты накопления массы в случае неустойчивости Рихтмайера-Мешкова характеризуются интегральной массой газа в слое между деформированным тангенциальным разрывом и преломленной ударной волной. При этом $m_e(y)$ вычисляется по формулам, аналогичным случаю постепенно ускоряемого слоя (гл. 2). Только для M_e^* используется выражение $M_e^*(0) = \int_{x_c}^{x_c+\lambda} \rho(x, 0, 0) dx$, где x_c - положение невозмущенного тангенциального разрыва.

При сопоставлении m_e для двух режимов ускоренного движения границы найдено, что наиболее отчетливо эффекты кумуляции массы проявляются при развитии возмущений достаточно тонких слоев газа (например, для $\delta_0/\lambda = 0.075$), подвергшихся постепенному ускорению.

В целом результаты расчетов показывают, что в случае импульсного ускорения плотного газа эффекты кумуляции и рост возмущений тангенциального разрыва выражены значительно слабее, чем при неустойчивом движении плотного слоя.

В четвертой главе исследуются проявления импульсного ускорения тангенциального разрыва в среде с высвечиванием. Рассматриваются два типа течений в условиях космоса. Первый связан с торможением высокоскоростного звездного ветра покоящейся межзвездной средой, второй — с задачей о взаимодействии ударных волн очень большой интенсивности с плотным плазменным облаком.

В **разделе 4.1** приведены имеющиеся в настоящее время сведения о параметрах звездного ветра и ударных волн, генерируемых при вспышках сверхновых звезд, а также о физических процессах высвечивания в околосредном газе. В рассматриваемых астрофизических объектах среда является полностью ионизованной оптически прозрачной водородной плазмой с малыми примесями ионов тяжелых элементов. Тепловое состояние горячей межзвездной среды определяется неупругими столкновениями частиц (ионов и электронов). В общем виде функция охлаждения представляется как $\Phi = n_p n_e \Lambda(T)$, где $\Lambda(T)$ — эффективность охлаждения, обусловленного радиационными процессами, а n_p и n_e — концентрации протонов и электронов. В расчетах используется $\Lambda(T)$, вычисленная в работах Д.П. Кокса, М. Кафатоса и С. Фалле. Характерной для выбранного вида кривой охлаждения является немонотонная зависимость от температуры. В частности, имеет место как возрастание эффективности охлаждения с увеличением T ($\sim [10^4 - 2 \times 10^5] K$), так и убывание $\Lambda(T)$ с ростом температуры ($\sim 2 \times [10^5 - 10^7] K$). Таким видом $\Lambda(T)$, как показали расчеты, обусловлены важные особенности течения с высвечиванием.

Раздел 4.2 посвящен численному моделированию развития возмущений тангенциального разрыва, возникающего при торможении высокоскоростного звездного ветра межзвездной средой. При взаимодействии звездного ветра с окружающей плазмой возникает нестационарное течение и вокруг звезды образуется двухслойная оболочка. Внешний слой (область “2”) ограничен ударной волной S_e в ионизованном межзвездном газе, а внутренний (“1”) — ударной волной S_i в звездном ветре. Обычно плотность $\rho_1 \ll \rho_2$, а давление $p_1 = p_2$, поэтому для температуры имеем $T_1 \gg T_2$. Тангенциальный разрыв D между слоями отделяет горячую плазму звездного ветра от менее нагретой межзвездной среды. При падении на поверхность D ударной волны со стороны горячей плазмы создаются условия для развития неустойчивости Рихтмайера–Мешкова. Происхождение таких ударных волн может быть обусловлено нестационарными процессами в звездном ветре, например, изменениями

скорости и плотности потока. Цель расчетов заключается в определении влияния высвечивания на характеристики движения возмущенного тангенциального разрыва и на эффекты кумуляции массы.

Рассмотрено взаимодействие плоской ударной волны S с неподвижным тангенциальным разрывом, положение которого в произвольный момент времени t задается равенством $x_D = x_D(y, t)$. Для определенности при $t = 0$ положено $x_D(0) = 0$, а концентрация и температура плазмы, следуя работе С.Фалле⁷, равны $n_{10} = \rho_{10}/m_H = 0.0735 \text{ см}^{-3}$, $T_{10} = 2.16 \times 10^7 \text{ K}$ и $n_{20} = \rho_{20}/m_H = 2.57 \text{ см}^{-3}$, $T_{20} = 6.14 \times 10^5 \text{ K}$ соответственно в невозмущенных прохождением ударной волны областях “1” и “2” (m_H -масса атома водорода). Скорость падающей ударной волны V является задаваемым параметром задачи и поэтому она лишь косвенно отражает нестационарные процессы в звездном ветре. В расчетах V выбиралась так, чтобы увеличение давления за фронтом ударной волны было порядка исходного давления в среде. В приводимом примере $V = 1.15 \times 10^8 \text{ см/с}$. В качестве характерных величин задачи определены скорость преломленной ударной волны U_S , время охлаждения t_c , концентрация n_{10} , температура T_{10} и пространственный масштаб движения $\mathcal{L} = U_S \cdot t_c$.

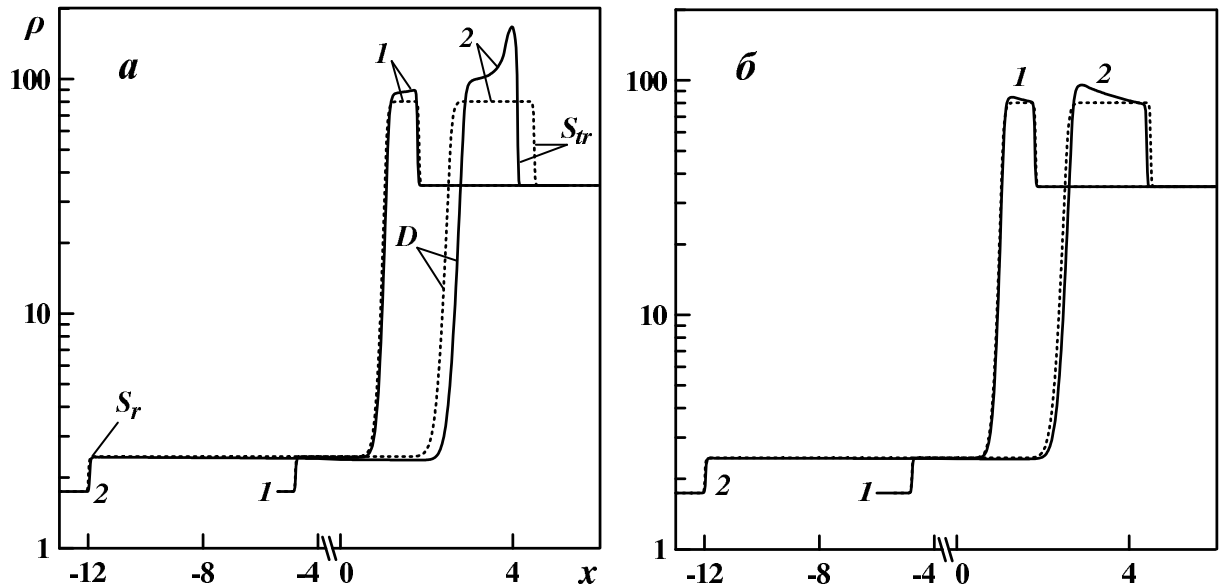


Рис. 4. Два типа распределения плотности после взаимодействия ударной волны с плоским тангенциальным разрывом. Тип **a** – температура газа перед преломленной ударной волной S_{tr} понижается со временем и тип **б** – температура остается постоянной. Сплошные линии – движение с высвечиванием, штриховые – адиабатическое течение. Время $t = 2, 5$ – соответственно для кривых 1, 2.

⁷Falle S.A.E.G. A numerical calculation of the effect of stellar winds on the interstellar medium. Astron. Astrophys.J. 1975. V. 43. P. 323-336.

Наиболее существенное свойство течений с высвечиванием заключается в образовании слоев плотного холодного газа. Это свойство проявляется уже в одномерной постановке. На рис. 4а видно, что на временах порядка t_c процесс охлаждения газа приводит к увеличению значения плотности, а также к уменьшению скорости преломленной волны S_{tr} . Характерна также немонотонная зависимость ρ от координаты x . Причем наибольшее значение плотности достигается не вблизи тангенциального разрыва D , а в области перед ним. Это обусловлено особенностями кривой охлаждения. Температура в межзвездной среде в приводимом примере $\sim 10^6$ К. Для ударных волн умеренной интенсивности темп охлаждения при переходе через скачок не меняется по порядку величины. Это означает, что из-за охлаждения со временем заметно уменьшаются температура и давление перед фронтом волны и за ним. Но в рассматриваемом диапазоне температур $\Lambda(T)$ возрастает при уменьшении T . Следовательно, частицы газа, прошедшие через ударную волну в более поздние моменты времени, охлаждаются быстрее, чем те, что находятся вблизи тангенциального разрыва. Наибольшее сжатие происходит ближе к ударной волне, чем к границе D . Факт влияния переменности темпа охлаждения на распределение ρ подтверждается расчетом на рис. 4б, где перед скачком “ S_{tr} ” температура принималась постоянной. Видно, что теперь плотность монотонно возрастает по направлению к разрыву D . Выявленная для случая, представленного на рис. 4а, особенность распределения плотности за фронтом ударной волны с высвечиванием ранее не отмечалась в литературе.

В расчетах принималось, что невозмущенная прохождением ударной волны среда и находящийся в ней тангенциальный разрыв покоятся. Применительно к течению звездного ветра это предположение справедливо, если длины волн возмущений λ малы по сравнению с расстояниями между поверхностями S_i, D, S_e и характерное время нарастания возмущений t_{inst} невелико по сравнению со временем изменения параметров звездного ветра. В работе выбор таких значений λ и t_{inst} был проведен с использованием расчетов динамики звездного ветра, выполненных С. Фалле⁷. Поскольку эффекты радиационного охлаждения наиболее существенны, когда t_{inst} порядка t_c , то соответствующим вариантам расчетов уделялось основное внимание. О возникающих при этом особенностях эволюции возмущений дает представление рис. 5, на котором показаны изохоры поля течения, отвечающего в начальный момент времени гармоническому по координате y возмущению

поверхности D , так что $x_D(y, 0) = A_0 \cos(2\pi y/\lambda)$, $A_0 = 0.4$, $\lambda = 4$.

Слева от графиков (рис. 5) приведены также изохоры в случае одномерного течения $x_D(y, t) = x_D(t)$, $x_D(0) = 0$. Образующиеся области между преломленной ударной S_{tr} волной и границей D значительно более плотные, чем при $\Lambda(T) = 0$. Причем толщина сжатого ударной волной слоя газа существенно уменьшается из-за радиационных потерь энергии. В то же время глубина проникновения более горячей плазмы в холодную (“пузырь”) и холодной в горячую (“струя”) не слишком отличаются от имеющих место при адиабатическом течении (А.Н. Алешин и др.). Достаточно слабо выражены и различия в эффектах накопления массы в областях газа, отстающих от основного движения границы D . Видно, что интегральные характеристики $m_e(y)$, полученные для адиабатического течения и при учете высвечивания, отличаются мало.

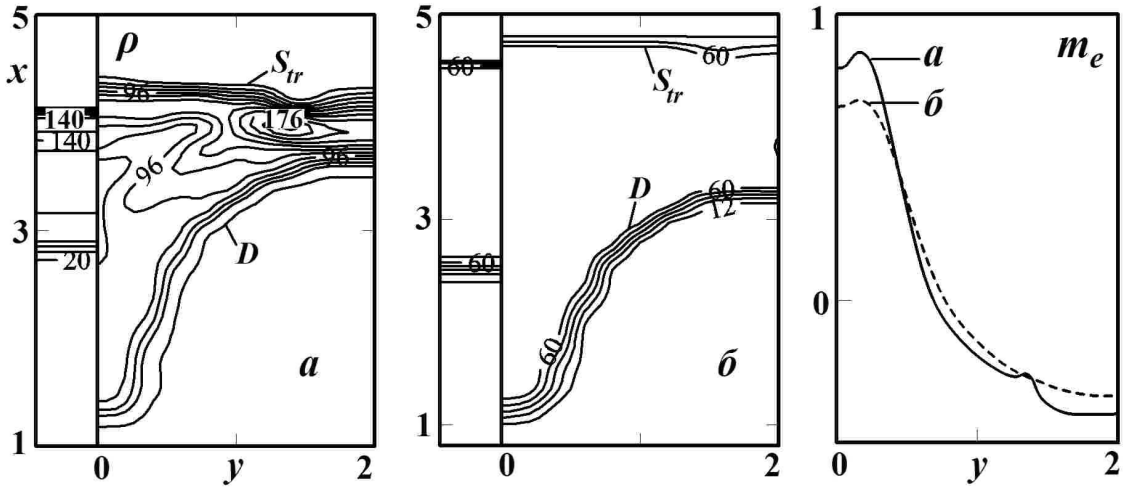


Рис. 5. Изохоры и функция накопления массы $m_e(y)$ при $t=5$ для движения с высвечиванием (а) и для адиабатического течения (б).

Из расчетов следует, что процессы высвечивания не влияют существенно на скорость роста начальных возмущений с $t_{inst} \sim t_c$ и на суммарную массу образующихся уплотнений. Однако отношение плотности сжатого преломленной ударной волной вещества к плотности окружающей плазмы значительно увеличивается.

В разделе 4.3 исследуется развитие двумерных возмущений тангенциального разрыва, ускоряемого ударной волной очень высокой интенсивности, когда скорость ударной волны в десятки раз превышает скорость звука в среде перед ударным фронтом. Полагается, что ударная волна генерируется при вспышке сверхновой звезды и взаимодействует с контактной границей области плотного вещества (облаком), содержащегося

изначально в межзвездной среде. Динамика такого взаимодействия и доминирующий механизм деформации контактной границы зависят от параметров ударной волны, геометрии и характерного размера конденсации L . В работе установлен такой диапазон изменения λ и L , в пределах которого развитие неустойчивости Рихтмайера–Мешкова произойдет раньше, чем ударная волна пересечет облако. Цель расчетов состоит в определении таких масштабов возмущений, для которых форма облака существенно изменится, прежде чем проявятся ранее исследовавшиеся более крупномасштабные эффекты (ускорение конденсаций как целого объекта; фокусировка огибающих уплотнение ударных волн; неустойчивость Кельвина–Гельмгольца). В разделе исследуется эволюция деформаций тангенциального разрыва, определяются их форма и скорость роста в зависимости от длины волны и от времени высвечивания. Для фиксированного момента времени найдены наибольшие размеры уплотнений.

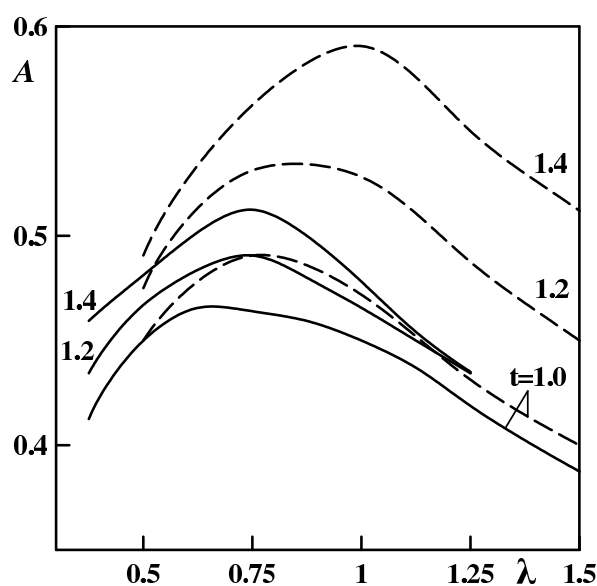


Рис. 6. Зависимость роста амплитуды от длины волны начального возмущения для движения с высвечиванием (сплошные линии) и для адиабатического течения (штриховые).

Конкретные расчеты проведены при условиях, характерных для остатка вспышки сверхновой G74.0-8.5 “Cygnus Loop” (Н.А. Левенсон и др.). При этом параметры неоднородного межзвездного газа, по которому распространяется ударная волна, выбирались согласно данным С. Орландо и др.⁸ Задача о развитии возмущений рассматривалась в той же

⁸Orlando S., Peres G., Reale F. et al. Crushing of interstellar gas clouds in supernova remnants - I. The role of thermal conduction and radiative losses. *Astron. Astrophys.* 2005. V. 444. P. 505-519.

постановке, что и в разд. 4.2. Следуя оценкам С. Орландо и др., в расчетах принято $n_{10} = 0.1 \text{ см}^{-3}$, $T_{10} = 10^4$, $n_{20} = 1 \text{ см}^{-3}$, $T_{20} = 10^3 \text{ К}$, $V = 3.88 \times 10^7 \text{ см/с}$. В соответствии с оценками $t_c \sim L/U_S$, если $L \sim 1 \text{ пк}$ (парсек). Отсюда $t_c < L/U_S$, когда $L > 1 \text{ пк}$.

Особенности нарастания двумерных деформаций тангенциального разрыва исследовались для различных длин волн. Использовались следующие начальные условия для возмущений: $x_D(y, 0) = A_0 \cos(2\pi y/\lambda)$, $A_0 = 0.125$, $\lambda = (0.375 - 1.5)$. Амплитуда возмущения A определялась как разность между глубинами проникновения горячего газа в холодный и холодного в горячий. Найденный в расчетах вид $A(\lambda)$ в фиксированные моменты времени представлен на рис. 6. Как и в экспериментах А.Н. Алешина и др., графики $A(\lambda)$ имеют максимум, смещающийся со временем в область более длинных волн. Однако при $\Lambda \neq 0$ этот максимум значительно более резкий, чем в случае $\Lambda = 0$. Физически это объясняется тем, что с ростом длины волны уменьшается инкремент нарастания возмущений. Следовательно, для достаточно длинных волн $t_{inst} > t_c$, поэтому прежде чем $A(\lambda)$ увеличится, возникнет слабо искривленный слой очень плотной плазмы, испытывающий малое смещение после действия ударной волны. Тогда в соответствии с теорией Рихтмайера должна быть малой также амплитуда $A(\lambda)$.

Таким образом, в случае сильной ударной волны вследствие радиационного охлаждения эффективно подавляется рост длинноволновых возмущений. В то же время сохраняются основные качественные особенности деформаций тангенциального разрыва, характерные для волн умеренной интенсивности – наличие максимума $A(\lambda)$ и увеличение плотности сжатого ударной волной газа из-за потерь энергии на высвечивание.

В **заключении** диссертации подведены итоги работы и представлены ее основные результаты:

1. Разработана методика расчета двумерных плоских неустановившихся движений идеального газа с учетом процессов радиационного охлаждения.
2. Количественно исследован режим постепенного ускорения плотного газового слоя под действием разности давлений с обеих его сторон. Установлены критерии формирования достаточно регулярных “пальцеобразных” уплотнений со значительно различающимися в продольном и в поперечном направлениях масштабами. Выявлены

условия накопления массы в областях плотного газа, отстающих от основного движения слоя. Показано, что эффекты кумуляции массы имеют место, если плотность газа в слое существенно (более чем на порядок) превышает плотность газа вне слоя.

3. В результате расчетов деформаций плотного слоя найдено, что возникающие “пальцеобразные” уплотнения содержат около половины первоначальной массы слоя, а их поперечный размер на порядок меньше длины волны возмущений. Этот вывод согласуется с приближенными инерционными теориями развития деформаций тонких оболочек.
4. Проведен количественный анализ структуры течения газа в слое. Установлено, что слияние частей деформированного слоя может сопровождаться возникновением в слое ударных волн. Конфигурация этих ударных волн зависит от времени и на разных стадиях роста возмущений может иметь место как пересечение ударных волн, так и его отсутствие. В целом конфигурация волн сложнее, чем это предсказывается на основе известного в литературе качественного анализа.
5. Сопоставлена эволюция адиабатических возмущений слоя при его постепенном ускорении с эволюцией поверхности тангенциального разрыва, импульсно ускоряемого падающей на него плоской ударной волной. Выявлены морфологические отличия уплотнений при постепенном и импульсном режимах ускорения плотного газа.
6. Выполнены двумерные расчеты развития неустойчивости Рихтмайера–Мешкова с учетом процессов радиационного охлаждения и высоких интенсивностей ударных волн, ускоряющих тангенциальный разрыв. Установлено, что процессы высвечивания не влияют существенно на скорость роста начальных возмущений и на суммарную массу образующихся уплотнений, но значительно увеличивают плотность сжатого ударной волной газа и уменьшают вклад длинноволновых возмущений в деформации границы.
7. Найдены такие масштабы возмущений, для которых морфология неоднородной среды вследствие неустойчивости Рихтмайера–Мешкова существенно изменится, прежде чем проявятся более крупномасштабные эффекты, ранее анализировавшиеся в литературе.

Работы автора по теме диссертации

- [1] *Котова Г.Ю., Краснобаев К.В., Тагирова Р.Р.* Сравнительный анализ механизмов резонансного усиления возмущений ионизационно-ударного фронта // Ломоносовские чтения. Секция механики. 18-28 апреля 2006 г. Тезисы конференции. М.: Изд-во Моск. Ун-та, 2006. С. 94.
- [2] *Краснобаев К.В., Тагирова Р.Р.* Кумуляция массы и импульса в ускоренно движущейся сжимаемой среде // IV конференция молодых ученых “Фундаментальные и прикладные космические исследования”. 12 апреля 2007г. Тезисы докладов. М.: ИКИ РАН, 2007. С. 44.
- [3] *Краснобаев К.В., Тагирова Р.Р.* Накопление массы и импульса в ускоренно движущейся сжимаемой среде // Ломоносовские чтения. Секция механики. 16-25 апреля 2007г. Тезисы конференции. М.: Изд-во Моск. Ун-та, 2007. С. 95.
- [4] *Краснобаев К.В., Тагирова Р.Р.* Двумерное неустановившееся ускоренное движение плотного слоя газа // Тезисы докладов XV школы–семинара “Современные проблемы аэрогидродинамики”. 5-15 сентября 2007 г. М: Изд-во Моск. Ун-та, 2007. С. 63.
- [5] *Тагирова. Р.Р.* Влияние переменного ускорения на развитие возмущений поверхности тангенциального разрыва // Тезисы докладов XV школы–семинара “Современные проблемы аэрогидродинамики”. 5-15 сентября 2007 г. М: Изд-во Моск. Ун-та, 2007. С. 91-92.
- [6] *Тагирова. Р.Р.* Деформации поверхности тангенциального разрыва в газах, движущихся с ускорением // Труды конф.–конкурса молодых ученых НИИ механики МГУ. 10-12 октября 2007 г. Под ред. акад. Г.Г. Черного и проф. В.А. Самсонова. М.: Изд-во Моск. Ун-та, 2009. С. 206-212.
- [7] *Котова Г.Ю., Краснобаев К.В., Тагирова Р.Р.* Двумерные неустановившиеся движения фотоиспаряемых газовых оболочек // Сб. Проблемы современной механики: к 85-летию со дня рождения академика Г.Г. Черного. / Под ред. А.А. Бармина - М.: Изд-во Моск. Ун-та, 2008. С. 190–206.
- [8] *Краснобаев К.В., Тагирова Р.Р.* Исследования развития неустойчивости тангенциального разрыва под действием импульсного и постепенного ускорения // Актуальные проблемы российской космонавтики: Труды XXXII Академических чтений по космонавтике. 29 января-1 февраля 2008г. Под ред. А.К. Медведевой. М.: Комиссия РАН, 2008, С. 185-186.

- [9] *Тагирова. Р.Р.* Ускоренное движение излучающей деформированной газовой оболочки // V конференция молодых ученых “Фундаментальные и прикладные космические исследования”. 9 апреля 2008г. Тезисы докладов. М.: ИКИ РАН, 2008. С. 41.
- [10] *Тагирова. Р.Р.* Развитие возмущений ускоренно движущегося газового слоя // Материалы докладов XV Международной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых “Ломоносов”. Подсекция “Механика”. Апрель 2008. М.: СП “Мысль”, 2008. С. 15-16.
- [11] ***Краснобаев К.В., Тагирова Р.Р.*** Моделирование неустойчивости ускоренно движущейся газовой оболочки // Изв. РАН. МЖГ. 2008. № 5. С. 163-172.
- [12] *Тагирова. Р.Р.* Взаимодействие ударной волны от сверхновой с неоднородностями в межзвездной среде // Всероссийская конференция “Астрофизика высоких энергий сегодня и завтра”. 24-26 декабря 2008. Аннотации докладов. ИКИ РАН. 2008. С. 36.
- [13] *Тагирова. Р.Р.* Моделирование двумерных деформаций ускоренно движущихся контактных поверхностей в сжимаемых средах // Сборник инновационных проектов “У.М.Н.И.К.”. М: Изд-во Моск. Унта, 2009. С. 78-81.
- [14] *Тагирова. Р.Р.* Роль переменности темпа высвечивания в распределении параметров плазмы за ударной волной // VI конференция молодых ученых. “Фундаментальные и прикладные космические исследования”. 9-10 апреля 2009г. Тезисы докладов. М.: ИКИ РАН, 2009. С. 40.
- [15] ***Краснобаев К.В., Тагирова Р.Р.*** О проявлении неустойчивости Рихтмайера-Мешкова в неоднородной межзвездной среде с высвечиванием // Письма в Астрон. ж. 2009. Т. 35. № 5. С. 364-371.
- [16] ***Котова Г.Ю., Краснобаев К.В., Тагирова Р.Р.*** Неустановившиеся движения плотных оболочек, порождаемых ионизационно-ударным фронтом в межзвездной среде // Вестн. МГУ. Сер.1. Математика, механика. 2009. № 3. С. 56-62.