

005533450

На правах рукописи

*К.Бауф*

Бацына Екатерина Константиновна

**БЕЗОТРАЖАТЕЛЬНОЕ РАСПРОСТРАНЕНИЕ ВОЛН В СИЛЬНО  
НЕОДНОРОДНОЙ СЖИМАЕМОЙ АТМОСФЕРЕ**

01.02.05 – Механика жидкости, газа и плазмы

**АВТОРЕФЕРАТ**  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук

26 СЕН 2013

Нижний Новгород – 2013

Работа выполнена на кафедре информационных систем и технологий  
Национального исследовательского университета Высшая школа экономики –  
Нижний Новгород

Научный руководитель: доктор физико-математических наук, профессор  
**Пелиновский Ефим Наумович**

Официальные оппоненты: **Доброхотов Сергей Юрьевич**  
доктор физико-математических наук, профессор,  
заведующий лабораторией механики природных  
катастроф ФГБУН «Институт проблем механики  
им. А.Ю. Ишлинского РАН»

**Савина Ольга Николаевна**  
доктор физико-математических наук, профессор,  
профессор кафедры Общей и ядерной физики  
ННГТУ им. Р.Е. Алексеева

Ведущая организация: ФГБОУ ВПО «Нижегородский государственный  
университет им. Н.И. Лобачевского»

Защита состоится 18 октября 2013 г. в 15 часов 30 минут на заседании  
диссертационного совета Д 212.165.10 при Нижегородском государственном  
техническом университете им. Р.Е. Алексеева по адресу: 630600, Нижний  
Новгород, ул. Минина, д. 24, корп. 1, ауд. 1258.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Нижегородского  
государственного технического университета им. Р.Е. Алексеева.

Автореферат разослан «16» сентября 2013 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета,  
доктор физико-математических наук,  
доцент



Катаева Л.Ю.

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

### Актуальность темы исследования

Исследование волновых процессов является актуальной тематикой механики сплошных сред. Изучение распространения акустико-гравитационных волн в сильно неоднородной сжимаемой среде является одновременно ключевой задачей современной атмосферной геофизики и астрофизики.

В теоретическом плане получение аналитических решений системы дифференциальных уравнений для акустико-гравитационных волн в атмосфере в виду ее сильной неоднородности даже в линейном приближении является трудной задачей. Одно из известных приближенных решений было получено для коротких (длина волны меньше размеров неоднородности) акустических волн, для которых выполняется приближение ВКБ [2]. В работах [6, 7] рассмотрены различные приближенные модели атмосферы, и получены аналитические решения для акустико-гравитационных волн. В [20] рассмотрена модель двухслойной солнечной атмосферы с кусочно-линейным профилем температуры и также получены аналитические решения.

Большое число работ в последние десятилетия, посвященных исследованию акустических волн в атмосфере, связано со способностью этих волн переносить значительные потоки энергии и импульса между слоями атмосферы. В атмосфере Земли такие волны оказывают сильное влияние на циркуляцию воздуха, определяющую метеорологическое состояние атмосферы. В атмосфере Солнца акустические волны участвуют в нагреве хромосферы и короны.

Циркуляция воздуха в атмосфере Земли, движение холодных и теплых фронтов связано с потоками энергии и импульса. Во многих работах экспериментально и численно показано, что акустико-гравитационные волны переносят между слоями атмосферы энергию, сравнимую с энергией солнечного излучения, нагревающего все слои атмосферы. В работе [13] на основе данных измерений вычисляется энергия, которую приносят в ионосферу гравитационные волны. Показано, что нагрев ионосферы происходит со скоростью от 10 К в день на высоте 95 км до 100 К в день на высоте 140 км (что сравнимо с нагревом этой области от солнечного света). Остаточная энергия этих волн, достигающая верхней части ионосферы (выше 140 км), может превышать  $0,1 \text{ мВт/м}^2$  и играть важную роль в энергетическом балансе верхней ионосферы. В [18] рассматривается рассеивание микробаром (инфразвука частоты 0,2 Гц), генерируемых волнами в океане, в нижней термосфере на высоте от 110 до 140 км. Показано, что поток энергии составляет около  $0,33 \text{ Вт/кг}$  и обеспечивает нагрев воздуха не менее 30 К в день. В [12] предложена численная модель рассеивания вертикальных акустических волн в термосфере. Приведенные вычисления доказывают, что акустические волны могут локально нагревать термосферу со скоростью в десятки кельвинов в день. В [15] на основе модели, учитывающей неоднородность и нелинейные процессы в атмосфере, исследуется разрушение акустических волн и нагрев атмосферы при этом. Показано, что акустические волны с периодом 3 мин могут нагревать

атмосферу на высоте 323-431 км на 13К в день. Таким образом, акустические волны, регистрируемые в ходе различных наблюдений в области мезопаузы и выше нее, могут быть причиной значительного нагрева термосферы.

В статье [17] инфразвуковые волны рассматриваются как источник колебаний температуры мезопаузы. В [4] изучается зависимость энергии, переносимой акустико-гравитационными волнами, от их спектральных характеристик. Показано, что существуют определенные частоты и длины волн, при которых перенос энергии наиболее эффективен, и волны именно с такими характеристиками преобладают в атмосфере полюсов Земли. В [10] с помощью численного моделирования акустико-гравитационных волн исследовано распространение и разрушение этих волн, приводящее к эффективному переносу энергии в верхние слои атмосферы. В статье [1] разработан численный алгоритм для решения системы дифференциальных уравнений в частных производных, описывающих движение акустико-гравитационных волн в атмосфере Земли. Вычисления для реалистичной модели атмосферы Земли MSISE-90 показывают, что, несмотря на сильную неоднородность параметров атмосферы, акустико-гравитационные волны проходят через всю атмосферу вплоть до ионосферных высот.

Вопрос о механизме нагрева хромосферы и короны Солнца до сих пор остается открытым. Считается, что низкочастотные акустические волны не могут распространяться на большие высоты в атмосфере Солнца вследствие сильного отражения от неоднородностей [19, 21]. В ряде работ показано, что высокочастотные акустические волны, наблюдаемые в атмосфере Солнца, обладают энергией, недостаточной для нагрева короны [9]. Однако последние данные наблюдений с более высоким разрешением показывают существование звуковых волн в верхних слоях атмосферы Солнца, обладающих достаточной энергией [11]. Кроме того, в работе [14] отмечено, что в немагнитной области хромосферы не наблюдаются магнитные волны, поэтому ее нагрев может происходить только за счет акустических волн.

В работе [8] на основе двумерной численной модели исследуется распространение акустических волн от точечного источника в атмосфере Солнца. С помощью численных экспериментов для модели атмосферы Солнца VAL3c [22] показано, что высокочастотные акустические волны распространяются из нижней атмосферы в корону, испытывая слабое отражение и перенося значительную энергию. Также, согласно численным экспериментам, точечный источник акустических колебаний с периодом 5 минут в верхней фотосфере приводит к генерации стоячих акустических волн в хромосфере и поверхностных волн в переходной области. В [16] рассмотрен более реалистичный случай присутствия двух источников звуковых колебаний разной частоты в области фотосферы и показано, что при определенных частотах этих источников в переходной области и в нижней короне возникают крупномасштабные температурные неоднородности.

Итак, несмотря на сильное отражение и рассеивание акустических волн в неоднородной атмосфере Земли и Солнца, из экспериментальных данных известно, что акустические волны переносят значительную энергию между

слоями атмосферы. Кроме того, предложено множество численных моделей, хорошо согласующихся с данными наблюдений, и доказывающих возможность переноса энергии акустическими волнами. В настоящей работе предлагается механизм, объясняющий передачу волновой энергии на большие расстояния. Он связан с существованием так называемых «безотражательных» волн в сильно неоднородной атмосфере.

#### **Цели диссертационной работы**

Основной целью диссертационной работы является нахождение безотражательных решений одномерного волнового уравнения в неоднородной сжимаемой атмосфере, объясняющих передачу волновой энергии на большие расстояния, и применению полученных результатов к геофизическим и астрофизическим приложениям. Для этого необходимо решить следующие задачи:

1. Найти преобразование уравнений газодинамики, описывающих акустические волны в сжимаемой неоднородной атмосфере, к уравнениям волнового типа с постоянными коэффициентами;
2. Определить безотражательные профили скорости звука в неоднородной атмосфере, допускающие передачу волновой энергии на большие расстояния;
3. Исследовать структуру волновых полей в такой безотражательной атмосфере;
4. Применить полученные результаты к анализу прохождения акустических волн в атмосферах Земли и Солнца.

#### **Научная новизна результатов работы**

В диссертационной работе получены следующие новые научные результаты:

1. Продемонстрирована возможность сведения уравнений для малоамплитудных звуковых волн в сжимаемом неоднородном газе к уравнениям типа Клейна-Гордона с постоянными коэффициентами (ранее этот подход применялся только к волновым полям в несжимаемой среде).
2. Найдены профили скорости звука в неоднородной атмосфере, при которых акустические волны распространяются без отражения, несмотря на неоднородность среды. Такие профили содержат, как правило, несколько констант, позволяющих хорошо аппроксимировать реально наблюдаемые неоднородности среды.
3. Исследована структура безотражательных акустических волн в такой атмосфере. В частности показано, что неоднородность среды может приводить к дисперсии волнового пакета в области низких частот, но не к его отражению.
4. Аппроксимированы так называемые стандартные профили атмосферы Земли и Солнца кусочно-непрерывными безотражательными профилями скорости звука и вычислены коэффициенты прохождения плоских акустических волн через реальную неоднородную атмосферу.

### **Положения, выносимые на защиту**

1. Метод сведения волнового уравнения для акустических волн в неоднородной сжимаемой атмосфере к уравнению с постоянными коэффициентами.

2. Наборы безотражательных профилей скорости звука для вертикального распространения акустических волн в неоднородной сжимаемой атмосфере.

3. Дисперсионные соотношения для акустических волн, распространяющиеся в безотражательной атмосфере.

4. Кусочно-непрерывная аппроксимация Стандартной Атмосферы Земли безотражательными профилями скорости звука. Коэффициенты прохождения акустических волн через Стандартную Атмосферу Земли.

5. Кусочно-непрерывная аппроксимация атмосферы Солнца VAL3c безотражательными профилями скорости звука. Коэффициенты прохождения акустических волн через модель атмосферы Солнца VAL3c.

### **Практическая значимость результатов работы**

Аналитические решения, описывающие безотражательное распространение акустических волн, имеют большое значение для физики атмосферы. Они позволяют провести быстрые оценки потоков энергии и импульса, переносимые акустическими волнами. Полученные результаты объясняют возможность удаленного зондирования верхних слоев атмосферы, поскольку безотражательные акустические волны способны преодолевать большие расстояния. Новые аналитические решения позволяют также тестировать численные методы, применяемые в атмосферных задачах.

### **Апробация работы**

Основные результаты диссертации представлялись на конференциях: General Assemblies of European Geosciences Union (Вена, 2010-2013); XVII-XIX Международной научно-технической конференции «Информационные системы и технологии» (Нижегород, 2011-2013); Международной конференции «Современные проблемы прикладной математики и механики: теория, эксперимент и практика», посвященная 90-летию со дня рождения академика Н.Н. Яненко (Новосибирск, 2011); The International Summer School - Conference "Advanced Problems in Mechanics - 2011" (Санкт-Петербург, 2011); XVII Нижегородской сессии молодых ученых (Нижегород, 2012, диссертант награждена поощрительным дипломом).

Результаты диссертации докладывались на семинарах факультета «Бизнес-информатики и прикладной математики» Национального исследовательского университета «Высшая школа экономики» и используются в российских исследовательских проектах, выполняемых при участии автора диссертации: РФФИ 13-02-00656 «Изгибные колебания корональных арок», а также в грантах Президента Российской Федерации для государственной поддержки молодых ученых – кандидатов наук МК-6734.2010.5 и МК-4378.2011.5, и РФФИ (11-05-00216, 12-05-00472, 12-05-33087).

**Достоверность полученных результатов** работы подтверждается корректностью и физической обоснованностью постановок решаемых задач. Достоверность полученных численных результатов связана с использованием известных численных схем и проверкой на известных аналитических решениях. Полученные результаты о прохождении акустических волн в верхнюю атмосферу Земли согласуются с известными экспериментальными данными.

#### **Публикации и личный вклад**

По теме диссертации опубликовано 13 печатных работ (из них 3 – в изданиях из перечня ведущих рецензируемых научных журналов и изданий, рекомендованных ВАК РФ). Работы [Б5, Б11-Б13] выполнены автором самостоятельно. В совместных работах научному руководителю и профессору Петрухину Н.С. принадлежат постановка задачи и обсуждение результатов, а также выбор методов исследования. Во всех работах автору принадлежит выполнение большинства аналитических и численных расчетов, представление полученных данных, а также непосредственное участие в обсуждении и интерпретации полученных результатов.

#### **Структура и объем работы**

Диссертация состоит из введения, трех глав, заключения и списка использованных источников. Общий объем диссертации – 140 страниц, включая 42 рисунка.

### **КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

Во введении обосновывается актуальность проблемы, сформулированы цели и задачи исследования, научная новизна и основные положения, выносимые на защиту, практическая значимость результатов работы, апробация, список публикаций по теме диссертации.

В первой главе, получены основные теоретические результаты, которые применены в главах 2 и 3 для исследования безотражательных волновых процессов в атмосферах Земли и Солнца. В разделе 1.2 описан аналитический подход к нахождению безотражательных волн в неоднородной среде, разработанный ранее в статьях [5]. В цитируемых работах он применялся к анализу волн в неоднородной несжимаемой среде применительно к океанологическим задачам. Интерес к таким решениям связан с проблемой переноса волновой энергии на большие расстояния. В неоднородной среде, в общем случае, эффекты рассеяния энергии волн оказываются весьма значительными. Они обусловлены не только прямым отражением от различного рода дискретных или размытых слоев скачков параметров среды, но и эффектами рефракции и дифракциями. Тем не менее, при специальных законах изменения параметров среды внутреннее отражение волн может отсутствовать, и, следовательно, волна может распространяться на большие расстояния. Решение подобных задач в перечисленных работах основано на сведении основных уравнений модели (в том числе и нелинейных) к уравнениям с постоянными коэффициентами, для которых существование бегущих волн тривиально доказывается. Этот подход применен в настоящей диссертации для нахождения условий на параметры сильно неоднородной

сжимаемой атмосферы, обеспечивающих распространение акустических волн на большие расстояния без потери энергии, и исследованию безотражательных волновых процессов в атмосфере Земли и Солнца.

В разделе 1.3 описаны основные уравнения движения газа в неоднородной сжимаемой атмосфере, используемые в настоящей диссертации. В разделе 1.3.1 кратко воспроизводится известный вывод линейных одномерных волновых уравнений, описывающих вертикальное распространение акустических волн, выписаны волновые уравнения для одномерной «дивергенции» скорости газа  $\chi(z, t)$  и вертикальной скорости газа  $V(z, t)$ , коэффициенты которых зависят от вертикального распределения скорости звука  $c(z)$ :

$$\frac{\partial^2 \chi}{\partial t^2} = c^2(z) \frac{\partial^2 \chi}{\partial z^2} + \left[ \frac{dc^2(z)}{dz} - \gamma g \right] \frac{\partial \chi}{\partial z}, \quad (1)$$

$$\frac{\partial^2 V}{\partial t^2} = c^2(z) \frac{\partial^2 V}{\partial z^2} - \gamma g \frac{\partial V}{\partial z}. \quad (2)$$

где  $t$  – время,  $z$  – вертикальная координата,  $g$  – ускорение свободного падения,  $\gamma$  – постоянный показатель адиабаты. Уравнения (1) и (2) являются основными для анализа безотражательных акустических волн в атмосфере Земли и Солнца.

В разделах 1.3.2 и 1.3.3 с помощью подхода, описанного в разделе 1.2, произведена трансформация уравнений (1) и (2), соответственно, к уравнениям Клейн-Гордона с постоянными коэффициентами, решениями которых являются вертикальные акустические волны, распространяющиеся на большие расстояния без потери энергии, при выполнении специальных условий на вертикальный профиль скорости звука. Для этого решения уравнений (1) и (2) представлены в виде:

$$v(z, t) = A(z)\Phi(\tau, t), \quad \tau = \tau(z), \quad (3)$$

где  $v(z, t)$  есть  $\chi(z, t)$  в разделе 1.3.2, и  $V(z, t)$  в разделе 1.3.3, а функции  $A(z)$ ,  $\Phi(\tau, t)$  и  $\tau(z)$  подлежат определению. После подстановки (3) в волновые уравнения (1) в разделе 1.3.2 и (2) в разделе 1.3.3, получены уравнения Клейна-Гордона с постоянными коэффициентами ( $P = \text{const}$ ):

$$\frac{\partial^2 \Phi}{\partial t^2} - \frac{\partial^2 \Phi}{\partial \tau^2} = P\Phi. \quad (4)$$

Условием постоянства коэффициентов в (4) являются специальные условия на функции  $c(z)$ ,  $A(z)$  и  $\tau(z)$ . В частности, скорость звука  $c(z)$  удовлетворяет неоднородному обыкновенному дифференциальному уравнению второго порядка. В разделе 1.3.2 из уравнения (1) получено дифференциальное уравнение для первого класса безотражательных профилей скорости звука:

$$\frac{d^2 c^2}{dz^2} - \frac{1}{4c^2} \left( \frac{dc^2}{dz} \right)^2 + \frac{\gamma^2 g^2}{c^2} = -4P. \quad (5)$$

Амплитуда акустической волны и время её распространения находятся через вертикальное распределение скорости звука как:

$$\tau(z) = \int \frac{dz}{c(z)}, \quad A(z) \sim \frac{1}{\sqrt{c(z)}} \exp \left[ \int 2H(z) dz \right], \quad (6)$$



где  $H(z) = c^2(z)/\gamma g$  – высота однородной атмосферы.

При описании распространения акустических волн с помощью волнового уравнения (2), "безотражательные" условия на вертикальную скорость звука, найденные в разделе 1.3.3, сводятся к:

$$\frac{d^2 c}{dz^2} - \frac{1}{2c} \left( \frac{dc}{dz} \right)^2 - \frac{2\gamma g}{c^2} \frac{dc}{dz} - \frac{\gamma^2 g^2}{2c^3} = \frac{2P}{c}, \quad (7)$$

и описывают второй класс безотражательных профилей. При этом функции  $A(z)$ ,  $\tau(z)$  и  $c(z)$  связаны соотношениями:

$$\tau(z) = \int \frac{dz}{c(z)}, \quad A(z) \sim \sqrt{c(z)} \exp \left[ \int \frac{dz}{2H(z)} \right]. \quad (8)$$

Дифференциальные уравнения (5) и (7) содержат произвольную постоянную, так что их решения в общем случае представляет собой трехпараметрические функции вертикальной координаты.

В разделе 1.4 приведены полученные аналитические решения для первого класса безотражательных профилей скорости звука в неоднородной сжимаемой атмосфере, описываемые уравнением (5). Приведем его здесь в безразмерном виде. Оно зависит от трех произвольных параметров  $\alpha$ ,  $\beta$  и  $h_0$ , которые могут меняться в широких пределах, как по величине, так и по знаку:

$$u = \sqrt{2|h+h_0|} \text{ при } \beta = 0, \alpha = 0; \quad h+h_0 = \pm \frac{2}{3\alpha^2} \sqrt{1+au}(au-2) \text{ при } \beta = 0, \alpha \neq 0, \quad (9)$$

$$\pm(h+h_0) = \frac{1}{\beta} \sqrt{\beta u^2 + au + 1} - \frac{\alpha}{2\beta^{3/2}} \ln \left[ 2\sqrt{\beta(\beta u^2 + au + 1)} + 2\beta u + \alpha \right] \text{ при } \beta > 0, \quad (10)$$

$$\pm(h+h_0) = -\frac{1}{|\beta|} \sqrt{-|\beta|u^2 + au + 1} - \frac{\alpha}{2|\beta|^{3/2}} \arcsin \left[ \frac{-2|\beta|u + \alpha}{\sqrt{\alpha^2 + 4|\beta|}} \right] \text{ при } \beta < 0, \quad (11)$$

где  $u = c(z)/c_0$ ,  $h = z/H_0$ ,  $H_0 = c_0^2/\gamma g$ ,  $\beta = -P/\omega_0^2$ ,  $\omega_0 = \gamma g/2c_0$ ,  $c_0$  – значение скорости звука на некоторой высоте  $z = 0$ ,  $H_0$  – высота однородной атмосферы для этой же высоты,  $\omega_0$  – частота отсечки акустических волн, соответствующая изотермической атмосфере, скорость звука в которой равна  $c_0$ . Виды безотражательных профилей первого класса для положительных ветвей формул (9)-(11) представлены на рис. 1.

Наличие трех параметров позволяет аппроксимировать реально наблюдаемые профили скорости звука на отдельных участках с весьма большой точностью. В разделе 1.4 показано, что существует два типа распространяющихся акустических волн в такой безотражательной среде. Первый тип, названный бездисперсионным (он реализуется при  $\beta = 0$ ), соответствует распространению волны без изменения временной формы вдоль трассы, меняется только ее амплитуда и время прихода в заданную точку. Второй тип, названный дисперсионным ( $\beta \neq 0$ ), соответствует волнам, которые диспергируют в неоднородной атмосфере. Все эти волны не отражаются в атмосфере, и вертикальный поток энергии для них остается постоянным с высотой.

В разделе 1.5 получены решения уравнения для безотражательных профилей скорости звука второго класса. Они найдены численно и также зависят от трех произвольных констант (рис. 2).

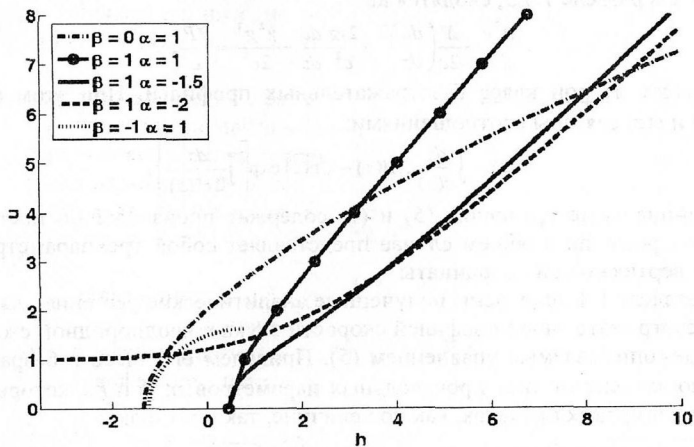


Рис. 1 – Безотражательные профили скорости звука первого класса

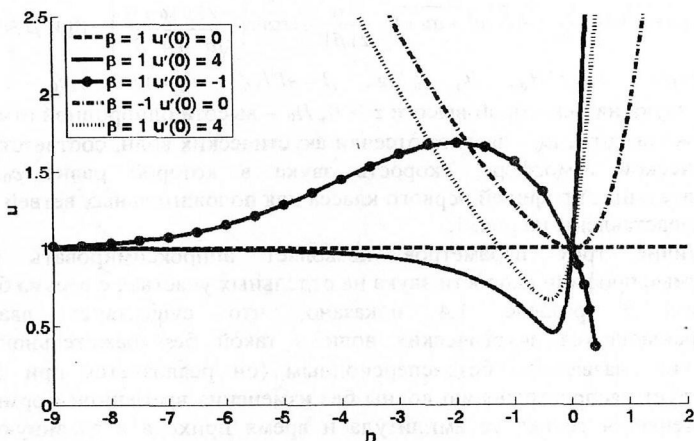


Рис. 2 – Безотражательные профили скорости звука второго класса

Аналитические решения уравнения (7) получены только в случае  $\beta = 0$ :

$$c^2(z) = c^2(0) - 2/3 \gamma g z, \quad c^2(z) = c^2(0) - 2 \gamma g z, \quad (12)$$

они соответствуют известной модели политропной атмосферы, когда температура, определяемая квадратом скорости звука, изменяется линейно с высотой. Рассмотрена структура бегущих акустических волн в неоднородной атмосфере на безотражательных профилях скорости звука второго класса. Демонстрируется, что вертикальный поток энергии не зависит от высоты, подтверждая отсутствие внутреннего отражения акустических волн в неоднородной атмосфере.

В разделе 1.6 обсуждается сопоставление найденных безотражательных волн в неоднородной атмосфере при использовании различных исходных волновых уравнений. В данной работе исследуются два уравнения (1) и (2) для одного и того же волнового поля, тем не менее, безотражательные профили скорости звука оказываются разными для каждого из этих уравнений. В результате, полное число безотражательных профилей увеличивается, как минимум, вдвое.

В разделе 1.7 приведены основные результаты данной главы.

Во второй главе исследуется проблема безотражательного распространения волн в неоднородной среде применительно к вертикальному распространению акустических волн в земной атмосфере с реальным распределением температуры.

В разделе 2.1 кратко суммированы известные результаты по исследованию акустико-гравитационных волн в атмосфере Земли. В разделе 2.2 описана структура земной атмосферы и приведены основные характеристики Стандартной Атмосферы Земли, обычно используемой в качестве модели усредненной земной атмосферы.

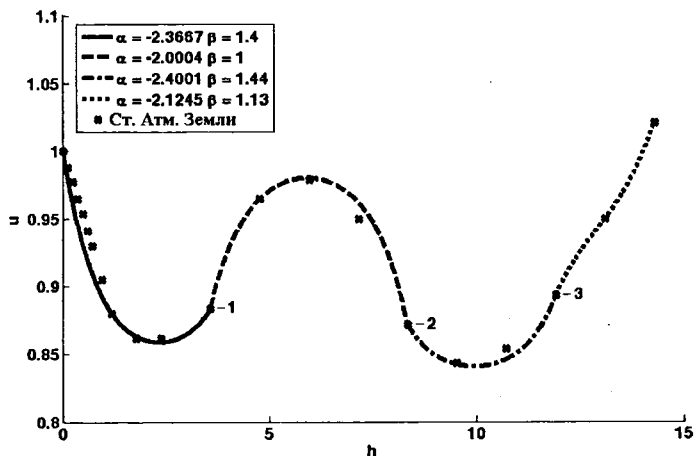


Рис. 3 – Аппроксимация профиля звука в Стандартной атмосфере Земли четырьмя безотражательными профилями первого класса. Цифрами обозначены точки сшивки безотражательных слоев

В разделе 2.3 выполнены аппроксимации Стандартной Атмосферы Земли безотражательными профилями скорости звука первого и второго классов. Показано, что реальный профиль скорости звука в атмосфере Земли может быть аппроксимирован четырьмя безотражательными слоями со слабыми скачками градиентов скорости звука. При одинаковом числе безотражательных слоев, аппроксимация скорости звука в земной атмосфере безотражательными профилями первого класса более точная, чем аппроксимация профилями второго класса; средняя ошибка аппроксимации составляет 0,8%, максимальная 2%. Аппроксимация Стандартной Атмосферы Земли безотражательными профилями (10) первого класса с различными значениями параметров  $\alpha$ ,  $\beta$  и  $h_0$ , приведена на рис. 3. Здесь высота нормирована на высоту изотермической атмосферы  $H_0 = 8.4$  км и скорость звука на  $c(0) = 330$  м/сек (оба параметра соответствуют поверхности Земли). Внутри каждого слоя акустическая волна распространяется без отражения, и все отражения на границах таких слоев являются сосредоточенными. Поскольку на границах слоев скорость звука остается непрерывной, а меняется скачком только градиент скорости звука, то можно надеяться на малость отражения акустической волны в целом при прохождении земной атмосферы.

В разделе 2.4 вычислены коэффициенты прохождения акустических волн через земную атмосферу, в случае, когда распределение скорости звука в ней аппроксимировано четырьмя безотражательными профилями первого класса. Граничные условия на границе сшивки безотражательных профилей выражают непрерывность скорости движения газа и давления. График для энергетического коэффициента прохождения волны  $Q$  через Стандартную Атмосферу Земли в зависимости от безразмерной частоты  $\sigma = \omega/\omega_0$ , приведен на рис. 4.

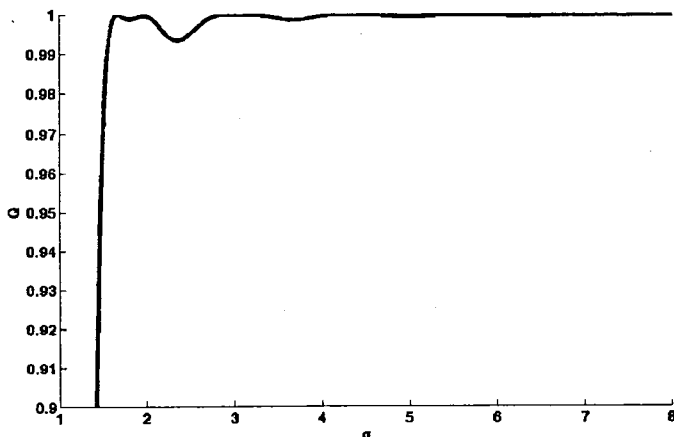


Рис. 4 – Энергетический коэффициент прохождения акустической волны через Стандартную Атмосферу Земли

Кривая зависимости энергетического коэффициента прохождения является не совсем монотонной, в ней проявляется слабый резонанс, связанный с отражениями на границах разделов слоев. Как следует из рис. 4, земная атмосфера прозрачна практически для всех волн с  $\sigma > 1.5$ , что соответствует периодам волн меньших 200 сек. Следует отметить, что акустико – гравитационные волны с подобными периодами наблюдались в ионосфере непосредственно над эпицентрами землетрясений [3], а также после запусков космических кораблей и ракет и мощных взрывов. Таким образом, земная атмосфера имеет параметры, близкие к безотражательным, что и объясняет хорошее проникновение волн в верхние слои, наблюдаемое в природе и в численных экспериментах.

В разделе 2.6 описана трансформация импульсных возмущений при вертикальном распространении в атмосфере Земли. Рассмотрена эволюция волнового пакета от импульсного источника Гауссовой формы в атмосфере с безотражательным профилем скорости звука первого класса. При малой (по сравнению с периодом отсечки атмосферы) длительности начального возмущения сигнал состоит из головной волны квазигауссовой формы и отрицательного хвоста с осцилляциями. Сигналы от импульсов средней длительности испытывают сильную трансформацию волнового поля. Если длительность начального сигнала велика, то волна практически не распространяется в атмосфере (существует полоса непропускания), и ее амплитуда становится очень малой.

Основные результаты второй главы суммированы в разделе 2.7.

**Третья глава** посвящена исследованию безотражательных акустических волн в солнечной атмосфере с реальными параметрами. Раздел 3.1 представляет собой краткий обзор известных результатов работ, посвященных исследованию акустических волн в атмосфере Солнца. В разделе 3.2 приведены основные сведения о солнечной атмосфере и выбранной модели атмосферы Солнца VAL3c.

В разделе 3.3 проведена аппроксимация распределение скорости звука в модельной атмосфере Солнца VAL3c безотражательными профилями первого и второго классов. На рис. 5 приведена аппроксимация солнечной атмосферы шестью безотражательными профилями второго класса. Здесь высота нормирована на высоту однородной атмосферы  $H_0 = 120$  км и скорость звука на  $c(0) = 7$  км/сек (оба параметра соответствуют солнечному температурному минимуму для модели VAL3c).

В разделе 3.4 вычислены коэффициенты прохождения вертикальной акустической волны через границы безотражательных слоев при аппроксимации как безотражательными профилями скорости звука первого класса, так и второго. Графики для энергетических коэффициентов прохождения волны  $Q$  в зависимости от безразмерной частоты  $\sigma$  для обоих случаев аппроксимации приведены на рис. 6. Энергетический коэффициент прохождения волны при аппроксимации атмосферы Солнца безотражательными профилями второго класса с увеличением частоты быстрее стремится к 1, чем при аппроксимации профилями первого класса.

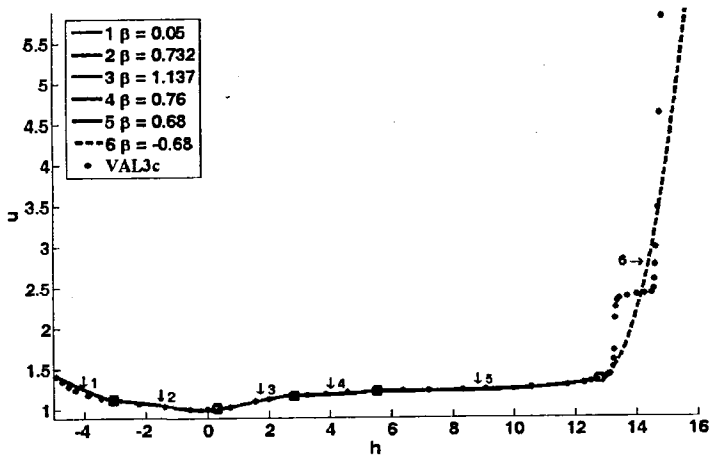


Рис. 5 – Аппроксимация модели атмосферы Солнца безотражательными профилями второго класса

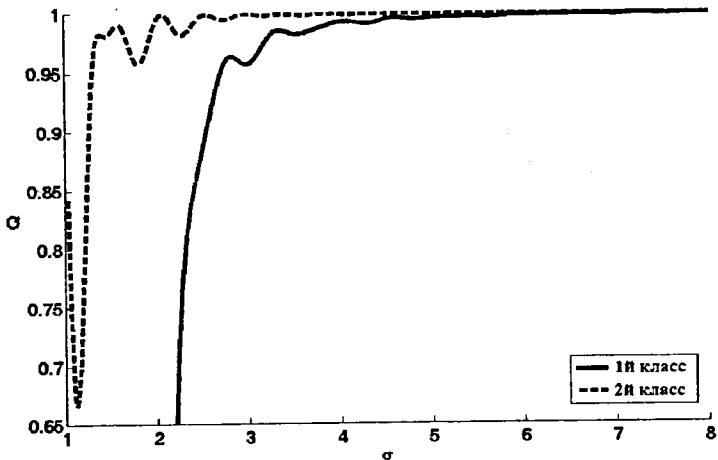


Рис. 6 – Энергетические коэффициенты прохождения акустической волны через модельную атмосферу Солнца VAL3c (сплошная линия – первый класс, пунктирная - второй)

При аппроксимации распределения скорости звука безотражательными профилями первого класса волны в диапазоне частот  $1,3 < \sigma < 2,6$  испытывают

большее отражение в верхней атмосфере, чем при аппроксимации профилями второго класса. Волны с  $\sigma > 2,6$  проходят без отражения. При аппроксимации профилями второго класса волны с частотами  $\sigma > 1,3$  или с периодами меньшими 200 сек., практически полностью проходят через атмосферу Солнца. И хотя, разные аппроксимации дают разные значения для частоты отсечки, которые пока нельзя проверить экспериментальными данными, обе модели демонстрируют хорошее проникновение волн в верхние слои, наблюдаемое в численных экспериментах.

Раздел 3.5 посвящен исследованию прохождения волн через температурный минимум атмосферы Солнца. Из анализа безразмерного аналога дифференциального уравнения для безотражательных профилей скорости звука второго класса (7) следует, что при  $\beta < 0$ , волны любых частот, а, следовательно, и с частотами меньшими, чем частота отсечки в эквивалентной изотермической атмосфере с температурой, равной температуре на уровне минимума, могут проходить через этот слой атмосферы. При положительных значениях  $\beta$ , частота отсечки  $\omega_{от}$  определяется формулой:

$$\omega_{от} = \beta^{1/2} \omega_0, \quad (12)$$

т.е. отличается от традиционной частоты отсечки  $\omega_0$  на множитель  $\beta^{1/2}$  и при  $\beta < 1$   $\omega_{от} < \omega_0$ . Таким образом, через область температурного минимума могут проходить без отражения вертикальные акустические волны с частотой меньшей, чем частота отсечки, соответствующая этому минимуму.

В разделе 3.7 приведены результаты третьей главы.

В заключении перечислены основные результаты диссертационной работы.

## СПИСОК ЦИТИРОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ахмедов Р.Р., Куницын В.Е. Численный метод решения задачи распространения акустико-гравитационных волн в атмосфере до ионосферных высот // Вестник Московского университета. Сер. 3. Физика. Астрономия, 2003. № 3. С. 38–42
2. Госсард Э., Хук У. Волны в атмосфере. М.: Мир, 1978. 532 с.
3. Гохберг М. Б., Шалимов С.Л. Воздействие землетрясений и взрывов на ионосферу. М.: Наука, 2008. 296 с.
4. Крючков Е.И., Федоренко А.К. Особенности переноса энергии в атмосфере акустико-гравитационными волнами // Геомагнетизм и аэрономия, 2012. Т. 52. № 2. С. 251–257.
5. Пелиновский Е.Н., Диденкулова И.И. Распространение волн в сильно неоднородной среде / Нелинейные волны' 2008. Ред. Гапонов-Грехов А.В., Некоркин В.И. Н. Н.: ИПФ, 2009. С. 191–204.
6. Петрухин Н.С. Волноводные свойства атмосферы с монотонно изменяющейся температурой // Астрон. журн., 1983. Т. 60. С. 703–708.
7. Савина О.Н. Акустико-гравитационные волны в атмосфере с реалистичным распределением температуры // Геомагнетизм и аэрономия, 1996. Т. 36. С. 104–110.

8. Erdelyi R., Malins C., Toth G., De Pontieu B. Leakage of photospheric acoustic waves into non-magnetic solar atmosphere // *Astronomy & Astrophysics*, 2007. V. 467. P. 1299-1311.
9. Fossum A., Carlson M. High-frequency waves are not sufficient to heat the solar chromosphere // *Nature*, 2005. V. 435. P. 919-921.
10. Gavrilov N. M., Kshevetskii S. P. Numerical modeling of propagation of breaking nonlinear acoustic-gravity waves from the lower to the upper atmosphere // *Advances in Space Research*, 2013. V. 51. P. 1168-1174.
11. Gonzalez N. B., Soriano M. F., Kneer F., Okunev O. Acoustic waves in the solar atmosphere at high spatial resolution // *Astronomy & Astrophysics*, 2009. V. 508. P. 941-950.
12. Hickey M.P., Schubert G., Walterscheid R.L. Acoustic wave heating of the thermosphere // *Journal of Geophysical Research: Space Physic*, 2001. V. 106. P. 21543-21548.
13. Hines C.O. Dynamical heating of the upper atmosphere // *Journal of Geophysical Research*, 1965. V. 70. P. 177-183.
14. Kalkofen W. Wave Heating of the Solar Chromosphere // *J. Astrophys. Astr.*, 2008. V. 29. P. 163-166.
15. Krasnov V., Drobzheva Ya., Lastovicka J. Acoustic energy transfer to the upper atmosphere from sinusoidal sources and a role of nonlinear processes // *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 2007. V. 69. P. 1357-1365.
16. Malins C., Erdelyi R. Direct propagation of photospheric acoustic p-modes into nonmagnetic solar atmosphere // *Solar Phys.*, 2007. V. 246. P. 41-52.
17. Pilger C., Bittner M. Infrasound from tropospheric sources: Impact on mesopause temperature? // *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 2009. V. 71. P. 816-822.
18. Rind D. Heating of the lower thermosphere by the dissipation of acoustic waves // *Journal of Atmospheric and Terrestrial Physics*, 1977. V. 39. P. 445-456.
19. Stix M. *The Sun. An introduction*. Berlin: Springer-Verlag, 2002. 490 p.
20. Taroyan Y., Erdelyi R. Global acoustic resonance in a stratified solar atmosphere // *Solar Physics*, 2008. V. 251. P. 523-531.
21. Ulmschneider P. The physics of chromosphere and coronae, In *lecture on solar physics*, LNP 619, Ed. Antia, Bhatnagar, Ulmschneider. Berlin: Springer-Verlag, 2003. P. 232-280.
22. Vernazza J.E., Avrett E.H., Loeser R. Structure of the solar chromosphere. III-models of the EUV brightness components of the quiet-sun // *Astrophys. J. Suppl.*, 1981. V. 45. P. 635-725.

### **ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ**

1. Продемонстрирована возможность сведения уравнений газодинамики для акустических волн в сжимаемой неоднородной атмосфере к волновым уравнениям типа уравнения Клейн-Гордона с постоянными коэффициентами.



2. Найдены безотражательные профили скорости звука в неоднородной атмосфере, при которых вертикальные акустические волны распространяются без отражения, несмотря на неоднородность среды, тем самым допуская передачу волновой энергии на большие расстояния.

3. Исследована структура безотражательных акустических волн в неоднородной сжимаемой атмосфере. Найдены дисперсионные соотношения для данных типов волн. Показано, что неоднородность среды может приводить к дисперсии волнового пакета.

4. Аппроксимированы распределение скорости звука в Стандартной Атмосфере Земли и модели атмосферы Солнца VAL3c кусочно-непрерывными безотражательными профилями скорости звука.

5. Вычислены коэффициенты прохождения акустической волны через Стандартную Атмосферу Земли и модельную атмосферу Солнца, показывающие возможность безотражательного распространения акустических волн в данных атмосферах.

## **СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ**

**Статьи в журналах из перечня ведущих периодических изданий ВАК:**

- Б 1 Петрухин Н.С., Пелиновский Е.Н., Бацына Е.К. Безотражательное распространение акустических волн в атмосфере Земли // Письма в ЖЭТФ, 2011. № 93. Вып. 10. С. 625 – 628.
- Б 2 Петрухин Н.С., Пелиновский Е.Н., Бацына Е.К. Безотражательное распространение акустических волн в атмосфере Солнца // Письма в Астрономический Журнал, 2012. Т. 38. № 6. С. 439 – 445.
- Б 3 Петрухин Н.С., Пелиновский Е.Н., Бацына Е.К. Безотражательные акустико - гравитационные волны в атмосфере Земли // Геомагнетизм и аэрономия, 2012. Т. 52. № 6. С. 854 – 860.

**Статьи в сборниках трудов конференций:**

- Б 4 Бацына Е.К., Пелиновский Е.Н., Петрухин Н.С. Безотражательное распространение волн в сильно неоднородной сжимаемой атмосфере // Современные проблемы прикладной математики и механики: теория, эксперимент и практика [Электронный ресурс] / Международная конференция, посвященная 90-летию со дня рождения академика Н.Н. Яненко, Новосибирск, Россия, 30 мая – 4 июня 2011 г., Новосибирск, ИВТ СО РАН, 2011, № гос. регистрации – 0321101160. <http://conf.nsc.ru/files/conferences/niknik-90/fulltext/38457/47075/Bacyna%20ext.pdf> 5 с.
- Б 5 Бацына Е.К. Оценка возможности передачи акустического излучения на большие расстояния в солнечной атмосфере // XVII Нижегородская сессия молодых ученых. Естественные, математические науки. 28-31 мая 2012 г. / Отв. за вып. И.А. Зверева. Н. Новгород: НИУ РАНХиГС, 2012. С. 177–180.

**Тезисы докладов конференций:**

- Б 6 **Batsyna E., Petrukhin N., Pelinovsky E.** Non-reflected propagation of the acoustic-gravity waves in inhomogeneous atmosphere // Geophysical Research Abstracts, 2010. V. 12. EGU 2010-2439.
- Б 7 **Batsyna E., Petrukhin N., Pelinovsky E.** Strong wave amplification in the atmosphere with large temperature gradients // Geophysical Research Abstracts, 2011. V. 13. EGU 2011-1573.
- Б 8 **Бацына Е.К., Пелиновский Е.Н., Петрухин Н.С.** Математические модели безотражательного распространения волн в сильно неоднородной атмосфере // XVII Международная научно-техническая конференция «Информационные системы и технологии» ИСТ-2011. Материалы конференции. Н. Новгород, 2011. С. 417.
- Б 9 **Batsyna E., Petrukhin N., Pelinovsky E.** Vertical wave propagation in the inhomogeneous compressible atmosphere // Abstracts. The International Summer School - Conference "Advanced Problems in Mechanics - 2011". St. Petersburg, 2011. С. 34.
- Б 10 **Batsyna E., Petrukhin N., Pelinovsky E.** Computer modeling of the Earth's atmosphere via reflectionless layers. // Geophysical Research Abstracts, 2012. V. 14. EGU 2012-123.
- Б 11 **Бацына Е.К.** Безотражательное распространение акустических волн в атмосфере Земли // XVIII Международная научно-техническая конференция «Информационные системы и технологии» ИСТ-2012. Материалы конференции. Н. Новгород, 2012. С. 361.
- Б 12 **Бацына Е.К.** Распространение акустических импульсов в неоднородной атмосфере // XVIII Международная научно-техническая конференция «Информационные системы и технологии» ИСТ-2013. Материалы конференции. Н. Новгород, 2013. С. 410.
- Б 13 **Batsyna E.** Solitary wave propagation in "non-reflected" medium // Geophysical Research Abstracts, 2013. V. 15. EGU 2013-2100.

## СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

### Введение

### 1 Безотражательные волны в неоднородной атмосфере

#### 1.1 Введение

#### 1.2 Аналитический подход к нахождению безотражательных волн в неоднородной среде

#### 1.3 Основные уравнения

##### 1.3.1 Волновые уравнения для сжимаемой неоднородной атмосферы

##### 1.3.2 Трансформация волнового уравнения к уравнению Клейн-Гордона (переменная $\chi$ )

##### 1.3.3 Трансформация волнового уравнения к уравнению Клейн-Гордона (переменная $V$ )

#### 1.4 Безотражательные профили скорости звука (1-й класс)

#### 1.5 Безотражательные профили скорости звука (2й класс)

#### 1.6 Замечания о числе безотражательных профилей

#### 1.7 Заключение

### 2 Вертикальные безотражательные акустические волны в атмосфере Земли

#### 2.1 Введение

#### 2.2 Основные данные об атмосфере Земли

#### 2.3 Безотражательное распространение акустических волн в Стандартной Атмосфере Земли

#### 2.4 Коэффициенты отражения и прохождения акустической волны через безотражательную атмосферу Земли

#### 2.5 Распространение импульсов в сильно неоднородной безотражательной атмосфере

#### 2.6 Заключение

### 3 Распространение безотражательных вертикальных волн в атмосфере Солнца

#### 3.1 Введение

#### 3.2 Некоторые сведения об атмосфере Солнца

#### 3.3 Безотражательное распространение волн через солнечную атмосферу

#### 3.5 Коэффициенты прохождения акустической волны через безотражательную атмосферу Солнца

#### 3.5 Прохождение волн через температурный минимум атмосферы Солнца

#### 3.6 Заключение

#### Заключение

#### Список использованных источников

Бацына Е. К.

Безотражательное распространение волн в сильно неоднородной  
сжимаемой атмосфере

Автореферат

Подписано в печать 13.09.2013. Формат 60x84<sup>1</sup>/16. Бумага офсетная.  
Печать трафаретная. Уч.-изд. л. 1,0. Тираж 100 экз. Заказ 647.

---

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексева.  
Типография НГТУ. 603950, Нижний Новгород, ул. Минина, 24.