

МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

им. М.В. ЛОМОНОСОВА

---

Физический факультет

На правах рукописи  
УДК 534.2

*АВЕРЬЯНОВ Михаил Васильевич*

**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ И ЧИСЛЕННАЯ МОДЕЛЬ  
РАСПРОСТРАНЕНИЯ НЕЛИНЕЙНЫХ  
АКУСТИЧЕСКИХ СИГНАЛОВ В ТУРБУЛЕНТНОЙ  
АТМОСФЕРЕ**

Специальность: 01.04.06 – акустика

А в т о р е ф е р а т

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук

Москва – 2008

Работа выполнена на кафедре акустики физического факультета Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова.

Научный руководитель: кандидат физико-математических наук,  
доцент Хохлова Вера Александровна,

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук,  
профессор Преображенский Владимир Леонидович

доктор физико-математических наук,  
профессор Карабутов Александр Алексеевич

Ведущая организация: Институт физики атмосферы  
имени А.М. Обухова РАН

Защита диссертации состоится “ 09 ” октября 2008 г. в 16.00 часов на заседании Специализированного Совета Д 501.001.67 в МГУ имени М.В. Ломоносова по адресу: 119991, ГСП-1, г. Москва, Ленинские Горы, МГУ, физический факультет, физическая аудитория имени Р.В. Хохлова

С диссертацией можно ознакомиться в научной библиотеке физического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова.

Автореферат разослан “ 26 ” августа 2008 г.

Ученый секретарь  
Специализированного Совета Д 501.001.67  
кандидат физико-математических наук

А.Ф. КОРОЛЕВ

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ.

### Актуальность темы

Проблема нелинейных взаимодействий акустических волн в неоднородных движущихся средах является актуальной для многих направлений современной медицинской акустики, аэроакустики и гидроакустики. Присутствие в среде неоднородностей различных типов, в том числе турбулентных полей, градиентов плотности и температуры, ветров или течений, во многом определяет пространственную и временную структуру нелинейного акустического поля. Исследование распространения и статистики мощных акустических сигналов в случайно-неоднородных средах с учетом эффектов дифракции и многократных фокусировок является также далеко не полно изученной фундаментальной проблемой физики нелинейных волн и представляет безусловный интерес для всех указанных выше приложений.

Ввиду сложности общей задачи описания взаимодействий акустических волн в неоднородных средах, её теоретическое исследование до последнего времени было основано на использовании упрощенных моделей, как, например, приближение нелинейной геометрической акустики. В частности, благодаря исследованиям, проводимым сотрудниками физического факультета МГУ, были получены аналитические решения для задачи распространения нелинейных волн в неоднородных стратифицированных средах, а также за случайным фазовым экраном. Однако лишь недавно, с развитием численных методов, стало возможным решение дифракционных задач о распространении нелинейных акустических сигналов в случайно-неоднородных средах.

Акустические неоднородности можно разделить на два типа. Неоднородности скалярного типа обусловлены пространственными флуктуациями скорости звука или плотности среды, например, за счет изменений в типе биологической ткани, флуктуаций температуры в воде или воздухе. Распространение нелинейных волн в средах со случайными неоднородностями такого типа исследовалось численно в рамках параболического приближения теории дифракции, а также двумерного волнового уравнения. Однако было рассмотрено лишь несколько конкретных задач, что, безусловно, не охватывает весь широкий класс важных для современной акустики проблем.

Особый интерес вызывают задачи, связанные с распространением нелинейных волн в средах с неоднородностями векторного типа, т.е. пространственными флуктуациями средней скорости движения частиц среды

вследствие образования вихрей, ветра или течений в среде. Такие задачи являются еще более сложными для анализа. Традиционный подход заключается в замене реальной движущейся среды гипотетической неподвижной средой с эффективной скоростью звука, учитывающей компоненту скорости движения среды в направлении распространения волны. Движущаяся среда, таким образом, моделируется как среда со скалярными неоднородностями и при этом не учитывается влияние поперечной компоненты скорости среды. Включение в модель и исследование влияния поперечной компоненты скорости среды представляется важным, поскольку во многих задачах преломленные звуковые волны, а также волны, рассеянные неоднородностями, могут распространяться в направлениях, отличающихся от исходного направления волны. Более того, если поперечная компонента поля скорости имеет ненулевое среднее значение, это может вызвать накапливающееся с расстоянием смещение и искажение пространственной структуры случайного акустического поля. Для линейного распространения звука недавно были получены эволюционные параболические уравнения, в которых сохранялись векторные свойства скорости движения среды. В нелинейном параболическом приближении, насколько нам известно, такие задачи ранее не исследовались.

Экспериментальное изучение нелинейных акустических полей в случайно-неоднородных средах, например, в атмосфере, затруднительно из-за сложности контроля параметров полевых условий и источников звука. Кроме того, натурные измерения требуют больших материальных затрат. Поэтому усилия ученых в последнее время во многом сконцентрировались на проведении экспериментов в лабораторных условиях, что оказалось хорошей альтернативой полевым измерениям. Для генерации  $N$ -волн большой амплитуды используются либо искровые источники, либо лазеры, для измерений – миниатюрные широкополосные микрофоны. Параметры источников звука, измерительных систем и турбулентных полей в таких экспериментах обладают хорошей повторяемостью и хорошо контролируются. Кроме того, для изучения влияния параметров турбулентности на формирование акустического поля, возможна генерация отдельно либо скалярной, либо векторной турбулентности с различными характерными пространственными масштабами. Проведенные к настоящему времени эксперименты, однако, ограничивались измерениями в турбулентной среде на расстояниях до формирования первых каустик, задаваемых крупномасштабными флуктуациями. Исследование нелинейных случайных полей в условиях многократного формирования случайных фокусов,

проведенное в данной работе, является безусловно важным.

Для описания звуковых волн в турбулентных средах также необходим статистический анализ получаемых данных. Как в эксперименте, так и при моделировании, имеются трудности с набором статистики. Как уже упоминалось, в натурных экспериментах трудно обеспечить повторяемость и контроль статистических параметров случайно-неоднородной атмосферы. Экспериментов по статистическому анализу параметров акустического поля с учетом многократного формирования случайных фокусировок, задаваемых крупномасштабными флуктуациями, не проводилось. В теоретических исследованиях статистический анализ проводился только в приближении геометрической акустики, что не позволяет оценить пиковые значения параметров акустического поля в областях случайных фокусировок. Численное моделирование нелинейных дифрагирующих волн в случайно-неоднородных средах проводилось лишь для отдельных реализаций случайно-неоднородных сред, поскольку набор статистики требует длительных вычислений.

Одной из актуальных проблем экспериментальных исследований в области нелинейной аэроакустики является развитие методов калибровки широкополосных микрофонов. Разработанные для непоглощающих сред (воды) методы абсолютной калибровки широкополосных датчиков по нелинейному изменению амплитуды либо изменению наклона плавной части импульсных сигналов не могут быть использованы для измерений в воздухе из-за сильного влияния вязкого поглощения и релаксации. Проведение численных расчетов с учетом указанных явлений может позволить определить параметры профиля волны, чувствительные лишь к нелинейным эффектам и, таким образом, обеспечить обоснование новых методов калибровки в поглощающих газах.

В данной работе, на основе предложенного эволюционного уравнения, разработаны численный алгоритм и комплекс программ, которые позволяют получать решения и исследовать статистические характеристики нелинейных акустических полей в случайно-неоднородных движущихся средах типа атмосферы с учетом эффектов дифракции, вязкости и релаксации, а также влияния поперечной к направлению волны компоненты скорости среды. Предложенный метод нелинейной калибровки широкополосных датчиков в поглощающей среде и проведенные в работе эксперименты в условиях многократного формирования случайных фокусов не только позволяют описать закономерности распространения акустических импульсов в неоднородной движущейся среде, но и путем сравнения с численными результатами, подтвердить справедливость развитой модели.

### **Цели и задачи диссертационной работы**

Основной целью диссертационной работы являлось экспериментальное и теоретическое исследование нелинейно-дифракционных эффектов при распространении акустических сигналов в случайно-неоднородных движущихся средах. В соответствии с заявленной целью было намечено решение следующих практически значимых задач:

1. Создание экспериментальной установки и исследование в лабораторных условиях статистических характеристик акустического поля  $N$ -импульсов в воздушном турбулентном потоке.
2. Развитие теоретической модели для описания распространения нелинейных акустических сигналов в неоднородных движущихся средах с учетом дифракционных, диссипативных и релаксационных процессов.
3. Развитие численного алгоритма, позволяющего моделировать задачи распространения нелинейных периодических и импульсных сигналов с узкими фронтами в неоднородной движущейся среде.
4. Определение относительного влияния нелинейных, диссипативных и релаксационных эффектов при распространении  $N$ -волны в условиях проводимого эксперимента в воздухе при отсутствии турбулентности для разработки метода калибровки широкополосной измерительной системы.
5. Экспериментальное и теоретическое исследование влияния нелинейных и дифракционных эффектов, а также случайных фокусировок в случайно-неоднородной движущейся среде на изменение статистики, а также пиковых и средних характеристик параметров акустического поля.

### **Научная новизна работы**

1. В нелинейное эволюционное уравнение типа Хохлова – Заболотской – Кузнецова, описывающее распространение интенсивных акустических волн в неоднородных средах, введено новое слагаемое, позволяющее учесть влияние флуктуаций скорости среды, поперечных направлению распространения волны.
2. Разработан новый численный алгоритм решения полученного нелинейного эволюционного уравнения для периодических и импульсных сигналов с узкими фронтами.
3. Впервые задача распространения интенсивных акустических волн в случайно-неоднородной движущейся среде исследована комплексно: с учетом нелинейных и дифракционных эффектов, вязкого поглощения и релаксации, а также эффектов, связанных с продольными и поперечными флуктуациями неоднородного поля скорости среды.

4. Показано, что поперечные флуктуации случайно-неоднородного поля скорости среды могут привести к значительному изменению пиковых значений и структуры акустического поля, как в продольном, так и в поперечном направлениях.
5. Предложен, обоснован и реализован новый экспериментальный метод калибровки измерительной системы по нелинейному удлинению  $N$ -волны в среде с поглощением и релаксацией (воздухе) с использованием определения длительности импульса по положениям нулей в его спектре.

*Достоверность* представленных в диссертационной работе результатов подтверждается проверочными численными и физическими экспериментами, а также соответствием результатов экспериментов априорной информации, теоретическим расчетам и данным, полученным в работах других авторов.

#### **Научная и практическая значимость работы**

1. Развита теоретическая модель и создан комплекс программ, позволяющих одновременно рассчитывать статистические распределения, а также пиковые и средние характеристики нелинейного акустического поля в случайно-неоднородной движущейся среде.
2. Для каждого из операторов модели проведена оптимизация численного алгоритма, позволяющая проводить расчет нелинейных волновых полей с минимальными затратами машинного времени.
3. Создана экспериментальная установка для исследований по распространению мощных акустических импульсов в турбулентной воздушной среде в лабораторных условиях и изучению формирования случайных фокусов первого и высших порядков.
4. Проведённое численное моделирование физических процессов при распространении  $N$ -волн в неоднородных движущихся средах позволяет получать характерные значения флуктуаций амплитуды и ширины фронта акустической волны. Эти результаты важны для практических задач аэроакустики и подводной акустики, современной неинвазивной хирургии с помощью мощного фокусированного ультразвука и литотрипсии.
5. Разработан экспериментальный метод калибровки микрофона по нелинейному удлинению  $N$ -волны в воздухе с учетом вязкости и релаксационных явлений для определения в лабораторных условиях спектральных характеристик чувствительности измерительной системы при изменении ее составляющих, геометрии или изменении её характеристик с течением времени.

### **Основные положения, выносимые на защиту**

1. Полученное в работе эволюционное уравнение типа ХЗК позволяет описывать распространение квазиплоских акустических волн в неоднородных движущихся средах с учетом влияния флуктуаций компоненты скорости среды, поперечной направлению распространения волны.
2. Развитый метод численного интегрирования полученного эволюционного уравнения, основанный на расщеплении волнового оператора по физическим факторам и оптимизации алгоритмов для каждого из них, позволяет моделировать распространение периодических и импульсных акустических сигналов в случайно-неоднородной движущейся среде с учетом нелинейности, дифракции, продольной и поперечной компонент флуктуаций скорости среды, вязкости и релаксации.
3. Полученные экспериментальные и теоретические результаты исследования эффектов акустической нелинейности и дифракции в турбулентной движущейся среде позволяют предсказать пространственную структуру акустического поля, определить статистические распределения, пиковые и средние характеристики параметров поля в условиях многократного формирования случайных фокусов.
4. На распространение квазиплоской акустической волны в случайно-неоднородной движущейся среде оказывают заметное влияние не только флуктуации скорости звука и продольной компоненты скорости среды, но и флуктуации поперечной компоненты скорости среды, которые приводят к поперечному сносу и изменению самой структуры акустического поля.
5. Разработанный метод абсолютной калибровки широкополосных микрофонов в газах, основанный на численном расчёте и измерении нелинейного удлинения  $N$ -волны по положениям нулей в её спектре, позволяет определять чувствительность микрофонов в условиях проявления эффектов вязкости и релаксации среды.

### **Апробация работы**

Вошедшие в диссертацию материалы докладывались на XII научной школе «Нелинейные волны 2004» (Нижний Новгород, 2004); на международном конгрессе CFA/DAGA'04, (Страсбург, Франция 2004); на конференции молодых ученых «Ломоносов 2004» (Москва 2004); на конференции «Волновые явления в неоднородных средах» (Звенигород 2004); на международной конференции IEEE UFFC (Монреаль, Канада, 2004); на 2-й международной конференции "Frontiers of Nonlinear Physics" (Нижний-

Новгород – Санкт-Петербург, 2004); на международной конференции Forum Acusticum (Будапешт, Венгрия 2005); на российско-французском семинаре RAS/SFA (Москва 2005); на сессии французского акустического общества “CFA06” (Тур, Франция, 2006); на конференции «Волны 2006» (Звенигород 2006); на международной школе-семинаре “Waves 2006” (Корсика, Франция 2006); на международной аэроакустической конференции AIAA/CEAS (Рим, Италия, 2007); на XIX сессии РАО (Нижний Новгород 2007), 18-м Международном Симпозиуме по Нелинейной Акустике (Стокгольм, Швеция, 2008), а также обсуждались на научных семинарах Акустического института им. Н.Н. Андреева, кафедры акустики и лаборатории вычислительного эксперимента в оптике кафедры общей физики и волновых процессов физического факультета МГУ.

Работа выполнена при поддержке грантов Президента РФ № НШ-4449.2006.2, РФФИ №06-02-16860, ИНТАС №05-1000008-7841, стипендии Американского Акустического Общества и специальной стипендии французского правительства для подготовки диссертации при совместном руководстве в рамках договора о сотрудничестве между Высшей Центральной Школой г. Лиона, Франция и физическим факультетом Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова.

### **Публикации**

Основные результаты диссертации изложены в 20 печатных работах, список которых приводится в конце автореферата, в том числе в 3-х статьях в реферируемых журналах.

### **Личный вклад автора**

Все изложенные в диссертационной работе результаты по разработке теоретической модели, численного алгоритма, постановке и выполнении физического эксперимента получены автором лично либо при его непосредственном участии.

### **Структура и объем диссертации**

Диссертация состоит из общего вводного раздела, пяти глав, первая из которых представляет собой обзор литературы, а остальные являются оригинальными. Каждая глава включает в себя короткое введение и выводы. Список цитируемой литературы включает 134 наименования, общий объем работы составляет 158 страниц текста, включая 72 рисунка.

## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** обосновывается актуальность темы диссертационной работы, излагается современное состояние проблемы, дается общая постановка задач, описывается краткое содержание работы по главам.

**В первой главе** представлен обзор литературы по экспериментальному и теоретическому исследованию распространения интенсивных акустических сигналов в турбулентной атмосфере. В §1.1 представлены результаты полевых и лабораторных измерений, показывающие, что для характерных параметров турбулентных полей в воздухе возможно формирование областей фокусировки акустического поля с высокими амплитудными значениями давления, в 2-3 раза превышающими пиковые значения в однородной среде.

**В §1.2** приведен обзор работ, посвященных описанию основных математических моделей распространения нелинейных акустических сигналов в неоднородных движущихся средах. Показано, что количественные результаты получены лишь для упрощенных моделей, в основном, в рамках приближения нелинейной геометрической акустики стратифицированных сред. Сравнительно недавно для численного моделирования распространения акустических сигналов в неоднородных средах стали использовать эволюционные уравнения, полученные в параболическом приближении теории дифракции. Явным преимуществом таких моделей является учет дифракционных эффектов. Однако опубликованные результаты, полученные в рамках параболического приближения, связаны либо с линейными задачами волнового распространения в движущихся средах, либо с описанием нелинейно-волновых полей в средах со скалярными неоднородностями. Количественного описания нелинейно-дифракционных акустических полей в неоднородных движущихся средах и их статистического анализа ранее не проводилось.

**В §1.3** приводится краткий обзор основных моделей случайно-неоднородных и турбулентных сред. Основное внимание уделяется модели случайно ориентированных Фурье мод, где случайное поле скорости турбулентной среды рассчитывается как:

$$\mathbf{u}(\mathbf{r}) = \sum_{j=1}^{J_{\max}} \tilde{U}(\mathbf{K}_j) \cos(\mathbf{K}_j \cdot \mathbf{r} + \phi_j) , \quad (1)$$

$$\tilde{U}(\mathbf{K}_j) \cdot \mathbf{K}_j = 0 \quad (2)$$

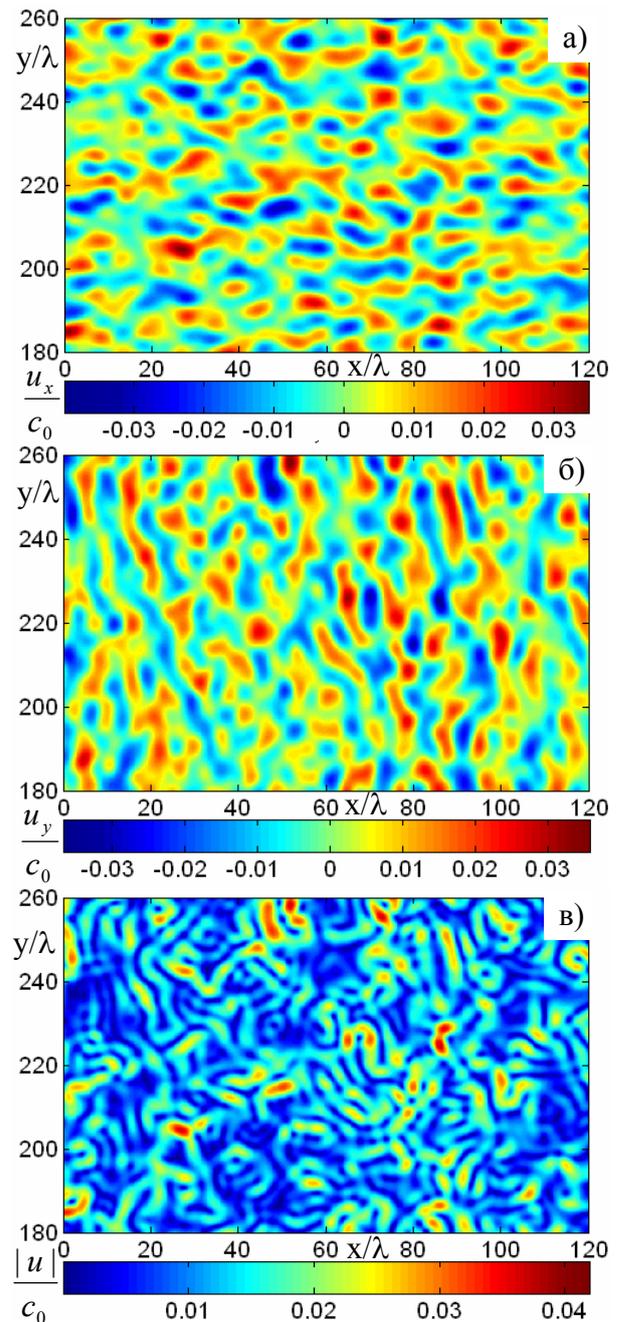
Здесь  $\mathbf{K}_j$  - волновой вектор,  $\phi_j$  - фаза  $j$ -ой Фурье моды. Случайный угол  $\theta_j$  между  $\mathbf{K}_j$  и осью  $x$ , и значения фазы  $\phi_j$  для каждой моды выбирается из независимых равномерных распределений на интервале  $[0, 2\pi]$ . Уравнение (2)

соответствует условию несжимаемости результирующего поля скорости. Амплитуда скорости каждой моды  $|\tilde{U}(\mathbf{K}_j)|$  в уравнении (1) определяется спектром кинетической энергии  $E(K)$  рассматриваемой модели турбулентного поля:  $|\tilde{U}(\mathbf{K}_j)| \sim \sqrt{E(K)}$ ,  $K = |\mathbf{K}|$ . Если рассматривается достаточно большое число мод в уравнении (1), каждая из которых выбирается в соответствии с уравнением (2) и с равномерно распределенными  $\theta_j$  и  $\phi_j$ , то итоговое поле скорости  $\mathbf{u}(\mathbf{r})$  является статистически однородным и изотропным, и имеет заданный энергетический спектр. Кроме того, при моделировании случайно-неоднородного поля скорости предполагается, что время распространения акустической волны по турбулентному слою мало по сравнению с характерным временным масштабом эволюции среды, то есть турбулентное поле считается «замороженным» (независимым от времени).

На рис.1 представлен пример одной реализации турбулентного поля скорости среды, рассчитанный на основе 300 Фурье мод, равномерно распределённых между  $0.01/L$  и  $9.0/L$  в гауссовом энергетическом спектре:

$$E(K) = \frac{1}{8} (u_{rms})^2 K^3 L^4 \exp\left(-\frac{K^2 L^2}{4}\right), \quad (3)$$

где  $(u_{rms})^2 = 9 \text{ м}^2/\text{с}^2$  - средний квадрат флуктуаций скорости,  $L = 4\lambda$  - характерный масштаб неоднородности и  $\lambda$  - длина акустической волны, распространяющейся в рассматриваемой неоднородной среде. На рис.1(а,б)



**Рис. 1** Пример реализации случайного поля скорости турбулентной среды с гауссовым энергетическим спектром для продольной (а) и поперечной (б) компонент флуктуаций скорости среды, а также ее модуля (в).

представлены пространственные распределения продольной и поперечной компонент флуктуаций скорости среды, а на рис.1в – её модуля. Таким образом, каждая моделируемая реализация случайно-неоднородной среды характеризуется формой ее энергетического спектра, средней квадратичной скоростью флуктуаций, характерным масштабом и набором случайных мод, задающихся стартовым числом в генераторе случайных чисел. В работе рассматривается турбулентность с гауссовым спектром, который является одномасштабной моделью энергетического спектра реальной атмосферы, и с мультимасштабным спектром Кармана, хорошо описывающим инерционный интервал энергий атмосферной турбулентности. Основные численные расчеты проводятся для гауссова спектра, что делает более наглядными получаемые результаты, но, в то же время, не ограничивает общности сделанных выводов.

**Вторая глава** диссертационной работы посвящена описанию экспериментальной установки и лабораторных измерений профилей давления, амплитудных значений, а также средних и статистических характеристик акустической волны в турбулентной среде. Созданная экспериментальная установка позволяет генерировать поля развитой турбулентности, а также акустические импульсы, распространяющиеся перпендикулярно турбулентному потоку (рис.2). Эксперимент проводился автором в Высшей Центральной Школе г. Лиона, Франция. В §2.1 представлена часть физического эксперимента, посвященная созданию и измерению развитых турбулентных полей. Основная задача этого эксперимента - поиск плоскости развитой турбулентности и последующее измерение ее статистических характеристик и корреляционных функций для определения характерных масштабов флуктуаций. Далее в этой плоскости проводятся акустические измерения.

Для создания развитой турбулентности используется мощный поток воздуха, нагнетаемый турбиной и выходящий из плоского сопла с размерами 160 x 1400 мм. За счет пограничных эффектов поток становится турбулентным

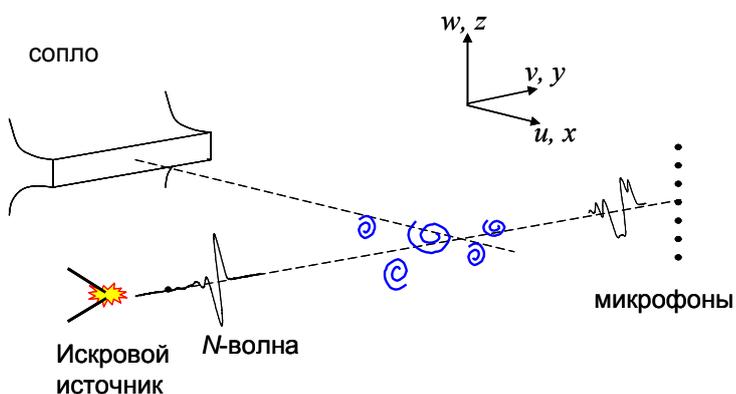
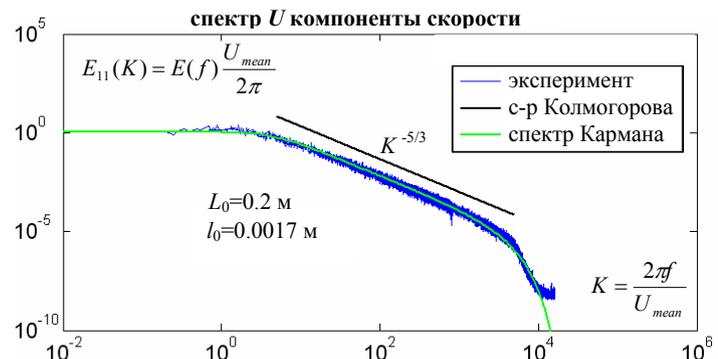


Рис. 2 Схема экспериментальной установки.

и на некотором расстоянии от сопла (около 3 м) формируемая турбулентность становится полностью развитой. Интенсивность флуктуаций в потоке определяется скоростью потока на выходе из сопла  $U_{jet}$ , которая варьируется от нуля до 40 м/с. При этом характерные

масштабы флуктуаций, независимо от скорости потока, определяются геометрией и размерами сопла. Для сохранения интенсивности воздушного потока вдоль него по границам сопла в вертикальной плоскости устанавливаются деревянные щиты. Измерения турбулентных флуктуаций производятся перекрестным термоанемометром DANTEC 55P51 с чувствительной частью длиной 1.25 мм, который калибруется в ламинарной области вблизи сопла по данным измерений трубкой Пито.

Энергетический спектр развитой турбулентности на расстоянии  $x = 3780$  мм от сопла соответствует по форме спектру Кармана, описывающему реальную атмосферную турбулентность (рис. 3). Величины внешнего ( $L$ ) и внутреннего ( $l_0$ ) масштабов флуктуаций в спектре Кармана можно определить путем сравнения



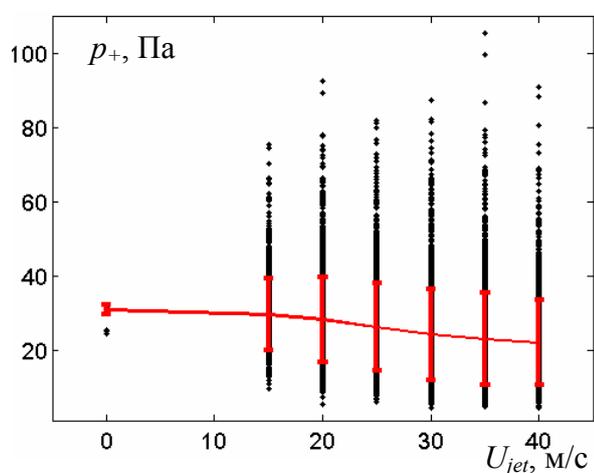
**Рис. 3** Сравнение измеренного энергетического спектра турбулентных пульсаций, спектра Кармана и закона «-5/3» Колмогорова для инерционного интервала. Измерения проводились на расстоянии  $x = 3780$  мм вдоль оси сопла.

аналитической формы спектра с экспериментальной:  $L \approx 0.2$  м,  $l_0 \approx 1.7$  мм. По энергетическому спектру турбулентного потока можно также определить и интегральный масштаб его флуктуаций, который в данном случае равен:  $L_f = L_{11}^{(1)} = \pi E(k=0)/(u_{rms})^2 \in [150, 170]$  мм, что совпадает с интегральным масштабом, полученным при интегрировании измеренной корреляционной функции  $L_f = 2L_g \in [166, 182]$  мм, где  $L_f$  и  $L_g$  - соответственно, продольная и поперечная корреляционные длины. Это является ожидаемым результатом, так как характерный масштаб флуктуаций определяется масштабом системы, которым в данном случае является ширина сопла, равная 160 мм.

Параметром, определяющим интенсивность флуктуаций является их средняя квадратичная скорость  $u_{rms}$  и  $v_{rms}$ . В указанной плоскости акустических измерений  $u_{rms}$  и  $v_{rms}$ , в зависимости от скорости потока на выходе из сопла, изменяются по следующему эмпирически установленному закону:  $u_{rms} = 0.23U_{mean} \approx 0.115U_{jet}$  и  $v_{rms} = 0.19U_{mean} \approx 0.095U_{jet}$  от 0 до 4.6 м/с, где  $U_{mean}$  - средняя скорость потока в указанной плоскости.

**В §2.2** описана экспериментальная установка по генерации акустических  $N$ -волн малой длительности (30 мкс) и большой амплитуды (1000 Па), а также

их измерению после прохождения турбулентного слоя. Для формирования акустических импульсов используется искровой источник на вольфрамовых электродах, а регистрация производится четырьмя широкополосными (до 140 кГц) микрофонами размером 1/8" *Bruel&Kjaer*, расположенными в жестком экране для уменьшения дифракционных эффектов. Результаты измерений представлены в виде примеров отдельных профилей различной формы, а также статистических распределений и средних значений основных параметров акустической волны: зависимости пикового положительного давления, ширины фронта и времени прихода волны от интенсивности турбулентных флуктуаций, а также от расстояния, пройденного волной в турбулентной среде. Проведены оценки ширины областей случайных фокусировок ( $< 4$  см).



**Рис. 4** Среднее значение пикового положительного давления  $p_+$  на расстоянии 2.2 м от источника при разных скоростях потока  $U_{jet}$  вблизи сопла.

На рис.4 представлена зависимость среднего значения пикового положительного давления  $p_+$  импульса от скорости потока  $U_{jet}$  на выходе из сопла. Черными точками представлены данные индивидуальных измерений 2000 импульсов для каждой скорости потока. Импульсы регистрировались на расстоянии 2.2 м от источника после прохождения турбулентного слоя толщиной 1.4 м. При наличии турбулентности появляется сильный разброс значений

пикового давления. Наблюдаются как профили, в которых уровень давления в 3-4 раза больше уровня, измеренного при отсутствии турбулентности, так и профили с очень низким пиковым давлением. С ростом скорости потока  $U_{jet}$  интенсивность турбулентных пульсаций усиливается, и наблюдается уменьшение среднего значения пикового давления. Например, при отсутствии потока среднее значение  $\langle p_+ \rangle = 30.9$  Па, а при  $U_{jet} = 40$  м/с -  $\langle p_+ \rangle = 22$  Па.

Далее приводятся результаты исследования статистики ширины переднего фронта и времени распространения импульса в турбулентном потоке. Ширина фронта определяется как время увеличения давления на фронте от уровня 0.1 до уровня 0.9 от пикового значения давления. По мере увеличения интенсивности флуктуаций ширина фронта в среднем увеличивается от 3 мкс в однородной среде до 10.5 мкс в турбулентной среде. При этом нижний предел вариаций всегда составляет не менее 3 мкс, что

объясняется ограниченной частотной характеристикой измерительной системы. Для времени прихода  $N$ -волны получено, что при увеличении интенсивности флуктуаций акустическая волна приходит в среднем быстрее, что согласуется с принципом наименьшего действия Ферма. Так, в неоднородной среде при  $U_{jet} = 40$  м/с импульс достигает микрофона в среднем на 26 мкс раньше (при начальной длительности импульса  $\sim 25$  мкс), чем в однородной среде.

**В §2.3** приведено сравнение характерных масштабов турбулентной среды и акустического поля в лабораторном эксперименте с соответствующими масштабами для нелинейных акустических импульсов в реальной атмосфере. **В §2.4** представлены выводы по второй главе диссертационной работы.

**Третья глава** диссертационной работы посвящена разработке метода определения спектральных характеристик измерительной системы для корректной интерпретации экспериментальных данных по измерению ширины и амплитуды фронта  $N$ -волны. В соответствии с поставленной задачей проведен лабораторный эксперимент и моделирование распространения нелинейных  $N$ -волн. Экспериментально и численно исследуется влияние эффектов нелинейности, вязкости и релаксации на изменение формы одиночной сферически расходящейся  $N$ -волны в воздухе в отсутствии турбулентности. Основываясь на полученных результатах, предложен и обоснован метод нелинейной калибровки широкополосного микрофона в условиях проявления диссипации. **В §3.1** представлены результаты измерений пикового положительного давления, ширины фронта, длительности и времени прихода импульса на расстояниях от 15 см до 2 м от искрового источника. Предложен новый метод определения длительности измеряемого импульса по положениям нулей в его спектре. Поскольку спектр сигнала, измеренного микрофоном, может быть представлен как умножение спектра истинного сигнала на плавную передаточную функцию измерительной системы, то положения нулей в его спектре не изменяется. При этом временной профиль импульса искажен, что делает стандартное определение его длительности во временном представлении неоднозначным и неточным.

**В §3.2** на основе модифицированного уравнения Бюргерса численно исследовано распространение сферически расходящихся  $N$ -волн большой амплитуды в однородной среде с релаксацией:

$$\frac{\partial p}{\partial r} + \frac{p}{r} = \frac{\beta}{\rho_0 c_0^3} p \frac{\partial p}{\partial \tau} + \frac{b}{2\rho_0 c_0^3} \frac{\partial^2 p}{\partial \tau^2} + \sum_{\nu=1}^2 d_{\nu} \frac{\partial}{\partial \tau} \int_{-\infty}^{\tau} \exp(-(\tau - \tau')/\tau_{\nu}) \frac{\partial p}{\partial \tau'} d\tau'. \quad (4)$$

Здесь  $p$  – акустическое давление,  $r$  – радиальная координата,  $\tau = t - (r-r_0)/c_0$  – время в бегущей системе координат,  $c_0$  – равновесная скорость звука на низких

частотах,  $r_0$  – расстояние от источника, на котором заданы граничные условия,  $\rho_0$  – плотность,  $\beta$  – коэффициент нелинейности,  $b$  – коэффициент вязкости воздуха. Каждый из релаксационных процессов в воздухе ( $O_2$  и  $N_2$ ) характеризуется соответствующим временем релаксации  $\tau_v$  и коэффициентом  $d_v = (c_\infty^v - c_0) / c_0^2 = c_v / c_0^2$  ( $v = 1, 2$ ), где  $c_\infty^v$  – так называемая “замороженная” скорость звука при распространении сигнала в среде, время релаксации  $\tau_v$  в которой значительно больше, чем характерный период сигнала  $T_s \ll \tau_v$ .

Уравнение (4) решается численно во временном представлении с использованием метода расщепления по физическим факторам. Такой подход позволяет получить решение полного уравнения (4), а также решений с исключением какого-либо физического эффекта. Это дает возможность оценить относительное влияние нелинейных, диссипативных и релаксационных эффектов на амплитуду и длительность распространяющегося акустического импульса. Сравнение показало, что амплитуда волны в равной степени зависит от всех указанных выше эффектов, но при этом её длительность определяется только нелинейными эффектами, как и при распространении идеальной  $N$ -волны в среде без вязкости и релаксации. Таким образом, длительность импульса в условиях проводимого эксперимента может быть определена из соотношений теории простых волн, что дает возможность абсолютной калибровки источника по измеренному нелинейному удлинению сигнала (§3.3). На основе метода наименьших квадратов с высоким коэффициентом корреляции  $R=0.975$  получены следующие значения амплитуды и длительности профиля  $N$ -волны на 15 см от источника:  $T = 28.6$  мкс,  $p_0 = 1150$  Па.

**В §3.4** на основе данных численного моделирования в условиях физического эксперимента получены частотные характеристики измерительной системы как отношение спектров импульсов, рассчитанных и измеренных на одинаковом расстоянии от источника. Показано, что определяемая таким образом амплитудно-частотная характеристика измерительной системы очень близка к амплитудно-частотной характеристике микрофона (полоса пропускания 140 кГц), предоставленной производителем.

Сравнение профилей волн, измеренных на различных расстояниях от источника, с профилями волн, рассчитанных с применением полученного фильтра, показало хорошее согласие по всем характерным параметрам  $N$ -волны: амплитуде, длительности и ширине фронта (§3.5). Таким образом, показано, что минимальная ширина фронта в эксперименте определяется ограниченной частотной характеристикой измерительной системы и составляет ~2.5- 3 мкс. **В §3.6** приводятся основные результаты и выводы по третьей главе.

**Четвертая глава** диссертационной работы посвящена выводу нелинейного эволюционного уравнения и разработке численного алгоритма, позволяющего рассчитывать распространение акустических сигналов в неоднородной движущейся среде с учетом поперечной направлению распространения волны компоненты флуктуаций скорости среды. В §4.1 приводится модифицированное эволюционное уравнение типа Хохлова – Заболотской – Кузнецова, учитывающее нелинейные и дифракционные эффекты, эффекты термовязкого поглощения, и эффекты, связанные с наличием скалярных и векторных неоднородностей среды:

$$\frac{\partial}{\partial \tau} \left[ \frac{\partial p}{\partial x} - \frac{\beta}{c_0^3 \rho_0} p \frac{\partial p}{\partial \tau} - \frac{\Delta c + u_x}{c_0^2} \cdot \frac{\partial p}{\partial \tau} + \frac{1}{c_0} (\mathbf{u}_\perp \nabla_\perp p) - \frac{p}{2\rho} \frac{\partial \rho}{\partial x} - \delta \frac{\partial^2 p}{\partial \tau^2} \right] = \frac{c_0}{2} \Delta_\perp p, \quad (5)$$

где  $x$  – направление распространения волны,  $c$  и  $\rho$  – скорость звука и плотность окружающей среды,  $u_x$  и  $\mathbf{u}_\perp = (u_y, u_z)$  – продольная и поперечные компоненты флуктуаций скорости среды соответственно,  $\Delta c = c - c_0$  – изменение скорости звука в среде за счет скалярных неоднородностей,  $\delta = b/(2\rho_0 c_0^3)$  – коэффициент термовязкого поглощения звука. Слагаемое, описывающее поглощение  $\delta \partial^2 p / \partial \tau^2$ , может быть заменено линейным оператором общего вида  $L(p)$ , если необходимо учесть эффекты релаксации или другие потери. Новым в данном уравнении является 4-е слагаемое, учитывающее компоненты движения среды, перпендикулярные направлению распространения волны.

При получении уравнения использовались допущения о том, что флуктуации характеристик среды изменяются медленно в пространстве и времени, а флуктуации скорости звука и скорости среды малы по сравнению со скоростью звука. Кроме того, параболическое приближение теории дифракции является хорошей моделью для описания распространения звука в направлениях не более  $20^\circ$  от оси, т.е. обеспечивает точность получаемых решений лишь для направленных пучков.

В §4.2 показано, что полученное эволюционное уравнение обладает свойствами подобия, которые позволяют найти решения для некоторых типов движения среды в присутствии малых флуктуаций на основе решений для эффективных флуктуаций.

В §4.3 представлены различные алгоритмы численного моделирования уравнения (5), которые реализуются в зависимости от временных характеристик излучаемого сигнала. Спектральный подход обычно используется при описании периодических волн (например, в задачах ультразвуковой хирургии), а временной подход – для моделирования

распространения импульсных сигналов (задачи диагностики, распространения акустических импульсов в атмосфере и океане). При реализации обоих подходов на каждом шаге сетки по координате распространения используется метод расщепления по физическим факторам.

При исследовании распространения периодических волн в качестве начального условия задается плоская синусоидальная волна, а решение представляется в виде временного ряда Фурье, при подстановке которого в эволюционное уравнение получается система нелинейных связанных уравнений для амплитуд гармоник исходной волны. Дифракционный оператор для каждой из гармоник рассчитывается с использованием схемы Кранка – Николсона. Для учета нелинейных эффектов, система связанных уравнений для гармоник решается методом Рунге-Кутты четвертого порядка точности для каждого из узлов сетки по поперечной координате. Расчет термовязкого поглощения, релаксации и продольной направлению распространения волны компоненты флуктуаций скорости среды, проводится последовательно с использованием точных решений. Для учета поперечных флуктуаций скорости среды используется схема Лакса - Вендроффа. Если характерная нелинейная длина равна  $x_n / \lambda = c_0^2 \rho_0 / 2\pi\beta p_0 = 20$ , а характерная длина диссипации равна  $x_d / \lambda = \lambda / (2\pi)^2 c_0^2 \delta = 500$ , то шаг сетки по координате вдоль оси пучка составляет  $h_x / \lambda = 2.5 \cdot 10^{-2}$ , а шаг сетки по поперечной координате равен  $h_y / \lambda = 2.0 \cdot 10^{-2}$ . Расчеты проводятся для  $N_{\max} = 150$  гармоник.

При исследовании распространения импульсных сигналов, профиль начального импульса задается в форме  $N$ -волны длительностью  $T_0$  и с фронтом, ширина которого определяется стационарным решением уравнения Бюргера:

$$V = \frac{\theta}{2\pi} \left[ \tanh\left(\frac{x_d}{4x_n}(\theta - \pi)\right) - \tanh\left(\frac{x_d}{4x_n}(\theta + \pi)\right) \right] \quad (6)$$

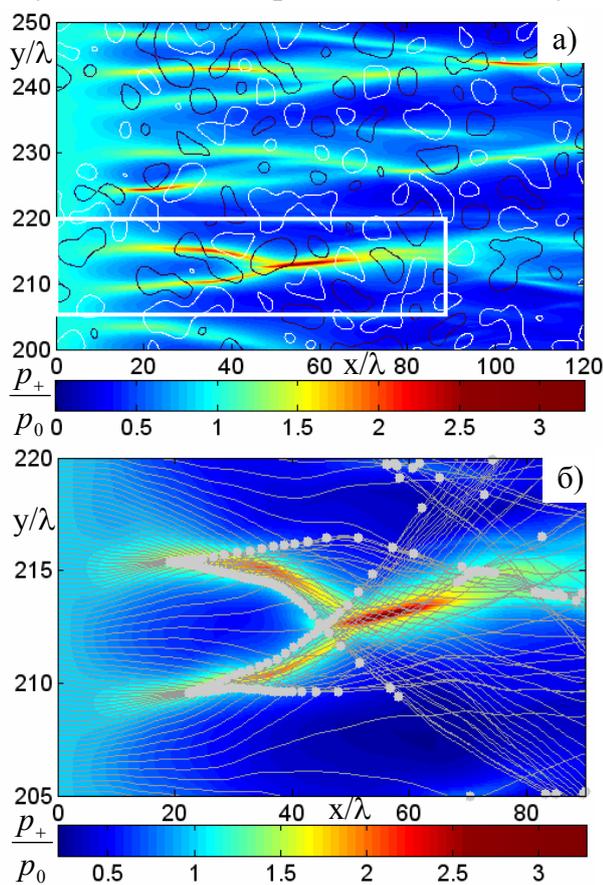
где  $V = p/p_0$  - акустическое давление, нормированное на исходную амплитуду и  $\theta = 2\pi t/T_0$  - безразмерное время. Ширина фронта такой волны составляет  $\sim 10x_n/x_d$ . В условиях лабораторного эксперимента  $x_d/\lambda \sim 6.6 \cdot 10^3$  и  $x_n/\lambda \sim 16.6$  ( $\lambda = c_0 T_0$ ), следовательно, ширина фронта равна  $10x_n/x_d = 0.025$ , что составляет всего 0.4% от длительности импульса. При численном моделировании это приводит к необходимости использования мелкомасштабной временной сетки и увеличению времени интегрирования, поскольку на ширину фронта волны должно приходиться достаточное количество узлов сетки. Для построения оптимального с точки зрения точности решения и производительности алгоритма проведено сравнение нескольких различных численных схем расчета

нелинейных эффектов и эффектов, связанных с конвекцией в продольном направлении. Окончательные расчеты проводятся следующим образом. Для расчета нелинейных эффектов в каждом узле пространственной сетки используется консервативная схема типа Годунова второго порядка точности по времени. Расчет дифракции проводится на основе алгоритма Кранка – Николсона, а учет конвекции в направлении, поперечном распространению волны - на основе численной схемы Лакса - Вендроффа. Конвекция в направлении распространения волны, частотно-зависимое термовязкое поглощение и релаксационные эффекты рассчитываются путем перехода в спектральное представление с использованием БПФ и далее, как и в алгоритме для периодических волн, использования точных решений для комплексных амплитуд гармоник.

Преимущество представленного алгоритма заключается в том, что он позволяет с высокой точностью рассчитать распространение акустических сигналов, имея всего 2-3 узла сетки на фронт волны. Для моделирования акустического поля при  $x_n/\lambda = 20$  и  $x_d/\lambda = 2.9 \cdot 10^3$  были выбраны следующие параметры численного счета:  $h_x/\lambda = 2.5 \cdot 10^{-2}$  и  $h_y/\lambda = 2.0 \cdot 10^{-2}$  - шаги, определяемые из условия устойчивости алгоритма и хорошего разрешения мелкомасштабных структур акустического поля (не менее 10 точек на наименьший масштаб поля). Число узлов сетки по времени на профиль волны  $n=1024$  было выбрано с запасом, чтобы точно описать ширину фронта волны в фокальных областях. При уменьшении указанных шагов сетки в два раза полученное решение по своим параметрам изменялось не более чем на 3%. Хорошая точность построенного алгоритма и эволюционной модели подтверждается также и сравнением тестовых расчетов для простых неоднородностей с существующими результатами, полученными на основе решения эволюционного уравнения в широкоугольном параболическом приближении (§4.4). В §4.5 приводятся основные результаты и выводы по четвертой главе диссертационной работы.

**Пятая глава** диссертационной работы посвящена численному исследованию распространения нелинейных акустических сигналов в неоднородных движущихся средах и сравнению результатов с данными эксперимента. Рассмотрены особенности распространения периодических волн (§5.1) и одиночных импульсов в виде  $N$ -волн (§5.2). На основе результатов численного расчета пиковых и средних характеристик, а также статистических распределений параметров акустической волны изучено влияние нелинейных и дифракционных эффектов и случайных фокусировок на формирование

структуры акустического поля. Влияние характерных масштабов и интенсивности флуктуаций движущейся среды, а также поперечной компоненты флуктуаций поля скорости среды исследовано на примере случайно-неоднородного поля с гауссовым энергетическим спектром (рис.1).



**Рис. 5** а) Распределение пикового положительного давления с отмеченными на нем уровнями флуктуаций скорости среды  $u_{||}/c_0 = \pm 0.009$ ; б) увеличенное изображение области фокусировки (внутри белого прямоугольника на рис.5а), распределение лучей и каустик.

$x/\lambda < 60$ , однако наблюдаются области фокусировки с относительно высоким давлением даже на больших расстояниях  $x/\lambda = 110$  (при нелинейной длине  $x_n/\lambda = 20$ ). На рис. 5б представлено увеличенное изображение фокальной области, обозначенной белым прямоугольником на рис.5а. Поверх картины пикового положительного давления изображены лучевые траектории (серые линии) и геометрические места каустик (точки), полученные при решении уравнений геометрической акустики. Лучевые траектории отчетливо показывают формирование каустик, а их положения качественно находятся в согласии с предсказаниями областей повышенного давления на основе

Пример пространственного распределения пикового положительного давления в поле распространяющейся  $N$ -волны представлен на рис.5. На рисунке также изображены линии уровней флуктуаций скорости среды. Видно, что из-за присутствия неоднородности, энергия звуковой волны перераспределяется в пространстве, образуя области повышенного и пониженного давления. При этом области повышенного давления формируются сразу после прохождения волной участков неоднородной среды, где эффективная скорость звука  $c_0 + u_x$  меньше, чем ее невозмущенное значение  $c_0$ . Несмотря на сильное нелинейное поглощение волновой энергии, пиковое положительное давление в областях фокусировки может более чем в три раза превышать амплитуду падающего импульса. Случайные фокусы образуются в основном на сравнительно малых расстояниях от источника,

нелинейного эволюционного уравнения (5). Тем не менее, положения каустик, полученных в высокочастотном приближении геометрической акустики, не совпадают с положениями максимальных уровней давления акустического поля. Более того, из-за пренебрежения эффектами дифракции, некоторые каустики формируются в областях, где амплитуда звукового давления на самом деле мала. Таким образом, дифракционные эффекты играют важную роль в формировании акустического поля, и их необходимо учитывать в теоретических моделях для получения реалистичных результатов.

При прохождении  $N$ -импульса через случайную каустику (область фокусировки) отмечено его значительное искажение (рис.6) при котором формируется  $U$ -волна с большой амплитудой давления и узким фронтом ( $x/\lambda = 56$ ). Эффекты случайных фокусировок и дефокусировок приводят к образованию и более сложных профилей: волн с закругленным положительным полупериодом ( $x/\lambda = 40$ ), волн с несколькими крутыми фронтами ( $x/\lambda = 83$ ) и удлинённых импульсов ( $x/\lambda = 115$ ). Вблизи областей фокусировки наблюдаются также и профили с несколькими пиками ( $x/\lambda = 51$ ). Наиболее крутые фронты образуются в областях фокусировки из-за повышенного уровня звукового давления и, следовательно, более сильного проявления нелинейных эффектов. Нелинейное искажение волны проявляется также и в областях пониженного звукового давления благодаря рассеянию высших гармоник на каустиках. Удлинение импульса за счет большой разности хода отдельных волн, приходящих в одну точку, делает маловероятными эффективную фокусировку и образование областей высоких давлений на больших расстояниях от источника.

Исследование статистики основных параметров нелинейной акустической волны показало ожидаемое уширение исходно узких распределений при удалении от источника. Увеличивается вероятность наблюдения более низких

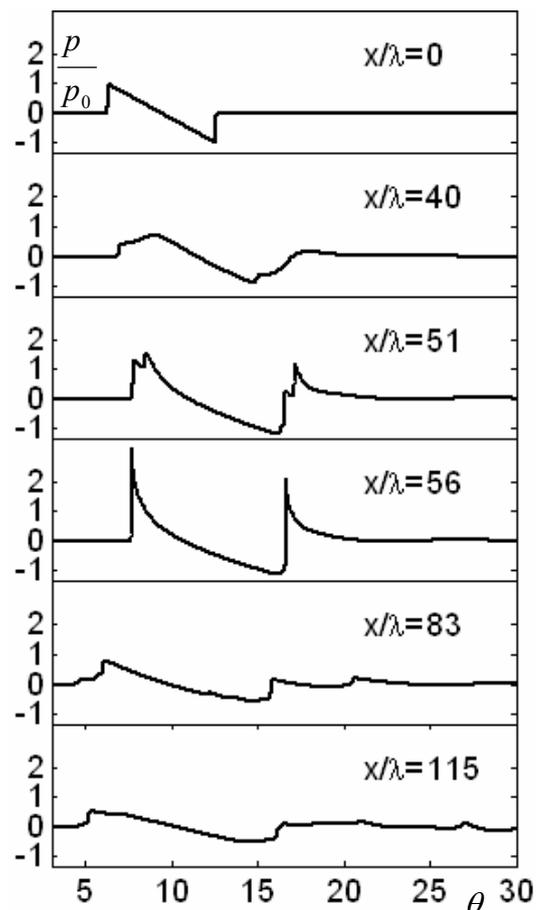
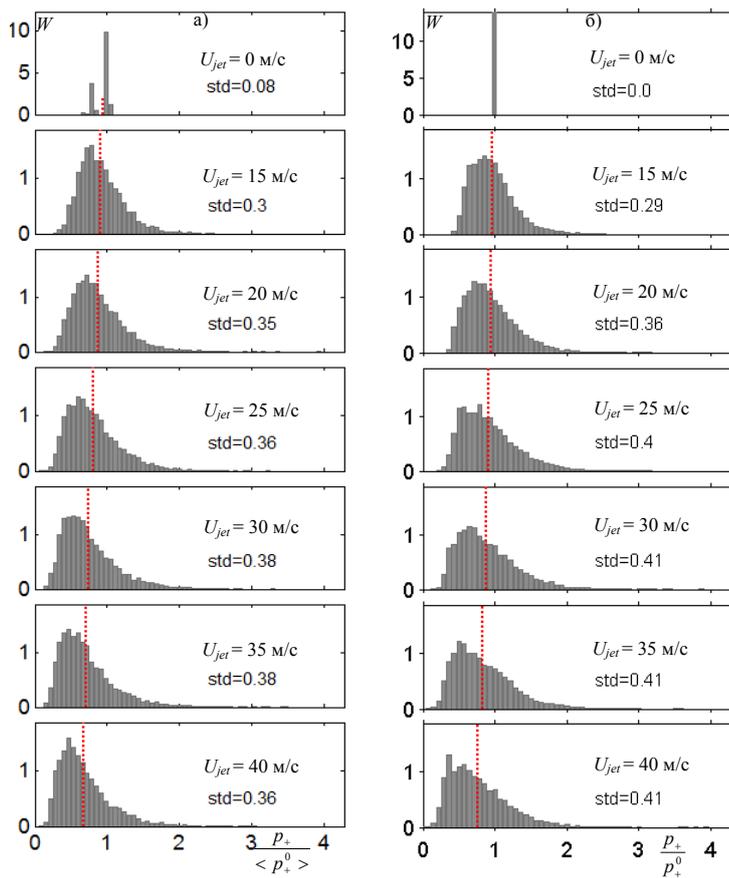


Рис. 6 Формы волн, измеренных на различных расстояниях от источника при прохождении через область фокусировки.



**Рис. 7.** Экспериментальные а) и рассчитанные б) гистограммы распределений пикового положительного давления  $p_+ / \langle p_+^0 \rangle$  на расстоянии 2,19м от источника при разной интенсивности турбулентных флуктуаций.  $\langle p_+^0 \rangle$  - его среднее значение в отсутствие турбулентных флуктуаций. Пунктирные линии – среднее значение. Std – стандартное отклонение

спектром Кармана, более точно описывающим мульти-масштабную структуру атмосферной турбулентности.

**В §5.3** проводится сравнение и показано хорошее качественное и количественное согласие результатов вычислений с экспериментальными данными для пикового положительного давления, ширины фронта волны и времени её прихода, несмотря на разную геометрию задач (3D геометрия эксперимента и 2D геометрия расчетов). На рис.7 представлены гистограммы распределений пикового положительного давления при разной интенсивности турбулентных флуктуаций. Экспериментальное распределение при  $U_{jet} = 0$  м/с (однородная среда) имеет конечную ширину за счет небольшой разности хода между источником и разными микрофонами, а также из-за флуктуаций при генерации волны источником данного типа. Как в эксперименте, так и в теории, при наличии турбулентности, распределения амплитуды давления значительно

амплитуд давления и более широких фронтов. Тем не менее, в согласии с экспериментом, существует ненулевая вероятность наблюдения высоких уровней пикового положительного давления (амплитуда в 3 раза больше начальной), и очень узких фронтов (ширина фронта  $(\theta_{0.1-0.9})_{min} = 0.022$  в 3 раза меньше начальной). Распределение плотности вероятности времени прихода достаточно быстро уширяется, показывая ранний приход импульса вплоть до  $\theta = -5.25 = -1.67\pi$ , что составляет более чем  $3/4$  длительности импульса. Приведены также результаты расчетов для распространения  $N$ -импульса в случайно-неоднородной движущейся среде с энергетическим

уширяются и принимают несимметричный колоколообразный вид, с длинным «хвостом» на больших амплитудах. Максимум распределений с увеличением  $U_{jet}$  смещается в сторону меньших амплитуд, таким же образом ведет себя среднее значение (вертикальные пунктирные линии). Максимальное превышение уровня давления в однородной среде в обоих случаях составляет около 4 единиц. Одновременно с увеличением интенсивности турбулентных флуктуаций до  $U_{jet} = 30$  м/с увеличивается и стандартное отклонение пикового положительного давления. Показано, что вероятность измерения амплитуд в два раза больших, чем в однородной среде, составляет около 2% как в эксперименте, так и в теории. В §5.4 приводятся основные результаты и выводы по пятой главе диссертационной работы.

В приложении приведена сводка основных формул геометрической акустики для расчета лучевых траекторий и положения каустик, а так же алгоритм выбора шагов сетки для численного расчета распространения волны в неоднородной среде. В заключении диссертационной работы приводятся основные результаты и выводы.

## ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

1. Создана экспериментальная установка для изучения в лабораторных условиях распространения коротких  $N$ -импульсов большой амплитуды (длительность 30 мкс, амплитуда  $\sim 1000$  Па) в турбулентном воздушном потоке со средней скоростью и амплитудой флуктуаций до 20 м/с. Показано, что энергетический спектр формируемой в потоке турбулентности по своей форме соответствует спектру турбулентных потоков в реальной атмосфере.

2. Получено модифицированное нелинейное эволюционное уравнение типа Хохлова - Заболотской - Кузнецова для описания распространения мощных акустических сигналов в неоднородной движущейся среде. Уравнение содержит новое слагаемое, учитывающее влияние компоненты скорости среды, перпендикулярной направлению распространения волны. Разработан численный алгоритм решения полученного эволюционного уравнения для периодических и импульсных сигналов с узкими фронтами. Численно исследованы особенности распространения нелинейных акустических сигналов в случайно-неоднородных движущихся средах.

3. Показано, что пространственная структура, пиковые и средние характеристики акустического поля в случайно-неоднородной движущейся среде определяются совместным влиянием нелинейных и дифракционных эффектов. Продемонстрированы преимущества нелинейно-дифракционного

подхода по сравнению с приближением геометрической акустики. Установлено, что нелинейные эффекты приводят к существенному изменению коэффициентов концентрации поля в области случайных фокусировок и, несмотря на сильное поглощение энергии на фронте волны, могут привести к существенному увеличению амплитуды давления и укручению фронта волны в областях фокусировки даже на расстояниях нескольких нелинейных длин.

4. Впервые исследовано влияние поперечной составляющей случайно-неоднородного поля скорости среды на формирование структуры нелинейного акустического поля. Показано, что характерная структура акустического поля в турбулентном потоке формируется в основном за счет влияния продольной направлению распространения волны компоненты случайной векторной неоднородности. В то же время, поперечные флуктуации оказывают влияние на структуру и пиковые значения поля, как в продольном, так и в поперечном направлении, и это влияние усиливается при увеличении характерных пространственных масштабов турбулентной среды.

5. Экспериментально и численно показано, что наличие случайных неоднородностей приводит к существенному уменьшению среднего пикового положительного давления (до 30 % на расстоянии 2 м от источника), увеличению средней ширины фронта (в 3 - 4 раза) и более раннему приходу  $N$ -волны (в среднем более чем на 15 мкс) по сравнению с теми же параметрами в однородной среде. Установлено, что в областях фокусировки возможна регистрация акустических импульсов с более чем четырехкратным увеличением амплитуды и соответствующим уменьшением ширины фронта. Впервые исследовано совместное влияние нелинейно-дифракционных эффектов на статистику широкополосного акустического поля в случайно-неоднородной движущейся среде в условиях многократного формирования каустик. Показано, что при нелинейном распространении различия в средних характеристиках волны в турбулентной и однородной средах уменьшаются.

6. На основе численного моделирования модифицированного уравнения Бюргерса показано, что в условиях эксперимента и для характерных параметров  $N$ -волны уменьшение амплитуды в равной степени зависит от нелинейных, релаксационных процессов и эффектов термовязкого поглощения, в то время, как удлинение профиля  $N$ -волны определяется только нелинейными эффектами. Используя данный результат, предложен, обоснован и реализован метод калибровки широкополосных датчиков в условиях проявления эффектов вязкости и релаксации по нелинейному удлинению  $N$ -волны с использованием определения длительности импульса по положениям нулей в его спектре.

## СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. Аверьянов М.В., Басова М.С., Хохлова В.А. *Стационарные и квазистационарные решения уравнения типа Бюргерса*. Акуст. журн., 2005, том 51, №5, с. 581-588.
2. Аверьянов М.В., Хохлова В.А., Сапожников О.А., Блан-Бенон Ф., Кливлэнд Р.О. *Параболическое уравнение для описания распространения нелинейных акустических волн в неоднородных движущихся средах*, Акуст. журнал, 2006, том 52 (6), с. 725-735.
3. Юлдашев П.В., Аверьянов М.В., Хохлова В.А., Оливьер С., Блан-Бенон Ф. *Сферически расходящиеся ударные импульсы в нелинейной релаксирующей среде*. Акуст. журн., 2008, том 54, №1, с. 40-50.
4. Аверьянов М.В., Басова М.С., Хохлова В.А. *Стационарные и квазистационарные решения уравнения типа Бюргерса*. Тезисы докладов XII научной школы "Нелинейные волны 2004" 29 февраля - 7 марта 2004, Нижний Новгород, с. 11.
5. Аверьянов М.В., Хохлова В.А. *Распространение нелинейных акустических волн в неоднородной движущейся среде*. Труды IX Всероссийской школы – семинара «Волны 2004», Московская область, 2004, секция 1, с. 23-24.
6. Averiyarov M.V., Basova M.S., and Khokhlova V.A. *Stationary and quasi-stationary solutions of the Burgers-type equations*. Proc. of the Joint Congress CFA/DAGA'04, March, 22-25, 2004, Strasbourg, France, V.1, p. 547-548.
7. Blanc-Benon P., Khokhlova V.A., Averiyarov M.V., Dallois L., Cleveland R.O. *Propagation of nonlinear acoustic signals through inhomogeneous moving Media*, Proc. of the Joint Congress CFA/DAGA'04, March, 22-25, 2004, Strasbourg, France, V.2, p. 1059-1060.
8. Басова М.С., Аверьянов М.В., Хохлова В.А. *Влияние частотного закона поглощения на эволюцию нелинейной акустической волны*, Сборник тезисов международной конференции «Ломоносов-2004», секция «физика», с.25,
9. Khokhlova V.A., Blanc-Benon P., Averiyarov M.V., and Cleveland R.O. *Propagation of nonlinear acoustic signals through inhomogeneous moving media*. Proceedings of the 2004 IEEE UFFC, 2004, p. 533-536.
10. Blanc-Benon Ph., Khokhlova V., Averiyarov M., and Cleveland R. *Propagation of nonlinear acoustic signals through inhomogeneous moving media*. In.: Proc. of 2nd International Conference "Frontiers of Nonlinear Physics" (July 5-12, 2004, Nizhny Novgorod - St. Petersburg, Russia) Ed. A Litvak., p. 674-678
11. Averiyarov M.V., Blanc-Benon P., Khokhlova V.A. and Cleveland R.O. *Diffraction of Nonlinear Acoustic Waves in Inhomogeneous Moving Media*. Proceedings of the Forum Acusticum, Budapest, Hungary, 2005, p. 1403-1408.
12. Khokhlova V.A., Blanc-Benon P., Averiyarov M.V., Cleveland R.O. *Diffraction of nonlinear waves in randomly inhomogeneous moving media*. In: Proc. of Joint Workshop RAS/SFA High intensity acoustic waves in modern technological and medical applications (14-18 November, Moscow, Russia), GEOS, 2005, p. 41-47.

13. Khokhlova V.A., Averiyarov M.V., Cleveland R.O., Blanc-Benon P. *Parabolic approximation versus geometrical acoustics for describing nonlinear acoustic waves in inhomogeneous media*. J. Acoust. Soc. Am., 2005, v.117, N4, Pt.2, p. 2595 (149th Meeting: Acoustical Society of America joint with the Canadian Association, Vancouver 16-20 May 2005).
14. Ollivier S., Averiyarov M., Yuldashev P., Khokhlova V., Blanc-Benon P. *Experimental and numerical study of the propagation of short duration acoustic N-waves in air*. 8ème Congrès Français d'Acoustique, 24-27 avril 2006, Tours, CD-ROM p. 925-928.
15. Blanc-Benon Ph., Averiyarov M.V., Khokhlova V.A., Cleveland R.O., Sapozhnikov O.A. *Nonlinear parabolic equation for acoustic wave propagation in inhomogeneous moving media*, 12th Long Range Sound Propagation Symposium, New Orleans, USA, 25-26 October 2006, CD-ROM.
16. Khokhlova V.A., Averiyarov M.V., Yuldashev P.V., Ollivier S., Blanc-Benon Ph. *Modeling and measurements of nonlinear spherically divergent N-waves in air*. J. Acoust. Soc. Am., 2006, v.120, N5, Pt.2, p. 3121-3122.
17. Ollivier S., Averiyarov M., Yuldashev P., Khokhlova V., Blanc-Benon Ph., *Spark-generated N-waves for laboratory-scale propagation experiments in air: measurements and modeling*. Proc. of ICA Congress, Madrid, 2-7 September, 2007, (e-version).
18. Averiyarov M.V., Yuldashev P.V., Khokhlova V.A., Ollivier S. and Blanc-Benon Ph. *Nonlinear Propagation of Spark-generated N-waves in Relaxing Atmosphere: Laboratory-Scaled Experiments and Theoretical Study*. 13th AIAA/CEAS Aeroacoustics Conference (28th AIAA Aeroacoustics Conference), paper AIAA 2007-3676.
19. Аверьянов М.В., Хохлова В.А., Кливлэнд Р.О., Блан-Бенон Ф., *Нелинейные и дифракционные эффекты при распространении ударных N-волн в случайно-неоднородных движущихся средах*. Труды XIX сессии РАО, 24-28 сентября, 2007, т. 1, с. 147-151.
20. Averiyarov M., Khokhlova V., Ollivier S., Blanc-Benon Ph., *Nonlinear propagation of sonic booms in turbulent atmosphere: laboratory scale experiment and theoretical analysis*. Programme 18th ISNA, 7-10 July 2008, Stockholm, Sweden, p. 32.