



УТВЕРЖДАЮ:

Заместитель декана физического факультета

МГУ имени М.В.Ломоносова

профессор

А.А. Федянин

«27» ноября 2015 г.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова»  
(физический факультет)

Диссертация Карзовой Марии Михайловны на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук «Нелинейные эффекты при отражении и фокусировке разрывных акустических волн в задачах атмосферной и медицинской акустики» выполнена на кафедре акустики физического факультета Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова».

В период подготовки диссертации соискатель М.М. Карзова являлась аспиранткой кафедры акустики физического факультета МГУ. Научный руководитель – доктор физико-математических наук Вера Александровна Хохлова, доцент кафедры акустики физического факультета Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова». Экспериментальная часть работы проводилась с использованием уникального оборудования Лаборатории механики жидкостей и акустики Высшей центральной школы г. Лиона, Франция, научный консультант – доктор философии (Ph.D.) Филипп Блан-Бенон, профессор, директор Лаборатории механики жидкостей и акустики.

В 2012 г. М.М. Карзова окончила физический факультет Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова» и получила диплом с присуждением квалификации «физик» по специальности «Фундаментальная радиофизика и физическая электроника».

Удостоверение о сдаче кандидатских экзаменов выдано в 2015 г. Федеральным государственным бюджетным образовательным учреждением высшего образования «Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова».

По итогам обсуждения принято следующее **заключение:**

Диссертационная работа М.М. Карзовой «Нелинейные эффекты при отражении и фокусировке разрывных акустических волн в задачах атмосферной и медицинской акустики» посвящена экспериментальному и теоретическому исследованию особенностей проявления нелинейных эффектов при отражении и фокусировке разрывных акустических волн в приложении к проблемам аэроакустики и задачам диагностического и терапевтического медицинского ультразвука. Диссертационная работа посвящена актуальным научным проблемам, имеет высокую теоретическую и практическую ценность, является законченным научным исследованием, удовлетворяет всем требованиям,

предъявляемым ВАК РФ к диссертациям на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук, и соответствует специальности 01.04.06 – акустика.

**Актуальность работы** обусловлена многочисленными применениями акустических разрывных волн в современных медицинских приложениях, использующих интенсивные (до  $30 \text{ кВт/см}^2$  в фокальной области пучка) фокусированные волны. При таких интенсивностях в профиле волны образуются ударные фронты, а вносимые биологические эффекты во многом определяются амплитудой ударного фронта. В аэроакустике большое внимание к задачам распространения разрывных волн и их отражения от границ обусловлено разработкой нового поколения сверхзвуковой пассажирской авиации. Импульсы звукового удара, или  $N$ -волны, образующиеся при полете таких самолетов, распространяются в атмосфере до поверхности земли, отражаются от нее и формируют акустическое поле с неоднородным распределением давления. Высокие уровни акустического давления могут оказывать вредное воздействие на людей и на строения.

Теоретические подходы к описанию данных задач медицинской акустики и аэроакустики достаточно сложны, и получение аналитических решений представляется возможным только в рамках упрощенных моделей. В представляемой работе для более полного описания пространственно-временной структуры полей разрывных волн предлагается использовать методы численного моделирования совместно с проведением модельных экспериментальных исследований.

**Цель диссертационной работы** состояла в экспериментальном и теоретическом исследовании особенностей проявления нелинейных эффектов при отражении и фокусировке разрывных акустических волн в приложении к задачам аэроакустики и медицинского ультразвука.

В рамках указанной цели решались следующие конкретные **задачи**:

1. Разработка оптических методов измерений профилей  $N$ -волны в модельном эксперименте в воздухе. Определение условий применимости разработанных методов и их временного разрешения.
2. Исследование нелинейного отражения  $N$ -волны от плоской жесткой поверхности в воздухе и определение условий наблюдения нерегулярного режима отражения.
3. Развитие численной модели на основе уравнения Хохлова-Заболотской-Кузнецова (ХЗК) для описания нелинейно-дифракционных эффектов в фокусированных пучках периодических волн и импульсов, создаваемых гауссовским и поршневым излучателями. Исследование влияния временной структуры волны и аподизации излучателя на предельно достижимые значения амплитуды давления в фокусе, а также возможности описания пространственных структур типа «ножки» Маха в рамках уравнения ХЗК.
4. Численное и экспериментальное исследование нелинейных эффектов в полях современных диагностических и ударно-волновых медицинских устройств. Определение уровней акустического давления, при которых в исследуемых полях образуется ударный фронт и проявляются эффекты насыщения параметров акустического поля.

**Основные результаты**, полученные в работе, состоят в следующем:

1. Созданы установки и реализованы оптические методы для измерений профилей акустического давления в нелинейной сферически расходящейся  $N$ -волне, создаваемой искровым источником в воздухе (шлирен-метод и метод измерения интерферометром Маха–Цендера). Показано, что временное разрешение шлирен-метода (3 мкс) определяется

временем экспозиции высокоскоростной камеры. Временное разрешение при измерениях интерферометром Маха–Цендера (0.4 мкс) в шесть раз превышает разрешение современных конденсаторных микрофонов, что делает возможным его использование для калибровки широкополосных измерительных устройств.

2. С помощью оптических методов (шлирен-метода и метода измерения интерферометром Маха–Цендера) визуализирована пространственная структура в виде «ножки» Маха и измерены профили сферически расходящейся  $N$ -волны в воздухе при ее нерегулярном отражении от плоской жесткой поверхности. Определены условия, при которых происходит переход от регулярного режима отражения  $N$ -волны к нерегулярному, и показано, что нерегулярное отражение имеет динамический характер.

3. На основе уравнения ХЗК численно исследованы эффекты нелинейного насыщения в фокусированных пучках периодических волн и импульсов, создаваемых гауссовским и поршневым излучателями. Показано, что насыщение давления в периодических полях связано в основном с нелинейным поглощением на ударном фронте волны, а в импульсных полях – с эффектом нелинейной рефракции, при этом в фокальной области пучков возможно образование пространственных структур типа «ножки» Маха.

4. Численно и экспериментально исследованы нелинейные эффекты в полях современных диагностических и ударно-волновых медицинских устройств. Показано, что в полях ударно-волновой терапии ударный фронт в профиле акустической волны образуется при уровнях акустического давления на источнике, в два раза превышающих используемые в клинике. В полях диагностической ультразвуковой решетки наблюдается эффект нелинейного насыщения, причем образование ударного фронта происходит при уровнях акустического давления на решетке, составляющих около одной трети от используемых в клинических экспериментах по ультразвуковому толканию почечных камней.

#### **Научная новизна работы:**

1. Показано, что применение оптических методов (шлирен-метода и метода измерения интерферометром Маха–Цендера) позволяет количественно измерять профили разрывных акустических волн, при этом временное разрешение шлирен-метода (3 мкс) определяется временем экспозиции высокоскоростной камеры, а временное разрешение в методе измерений интерферометром Маха–Цендера (0.4 мкс) – шириной лазерного пучка.

2. Впервые экспериментально исследовано нерегулярное отражение  $N$ -волны со значениями акустического числа Маха порядка  $10^{-3}$  от жесткой поверхности и измерены профили  $N$ -волны в окрестности тройной точки.

3. Впервые численно исследовано влияние временной и пространственной структуры фокусированного акустического пучка на проявление эффекта насыщения и формирования структур типа «ножки» Маха вблизи оси пучка.

4. Впервые на основе комплексного подхода, заключающегося в совместном использовании методов численного моделирования с граничными условиями, полученными из эксперимента, были исследованы особенности проявления нелинейных эффектов в фокусированных полях медицинских устройств ударно-волновой терапии (Duolith SD1) и диагностического ультразвука (решетка Philips C5-2).

#### **Практическая значимость**

1. Развитый оптический метод измерения профиля сферической  $N$ -волны интерферометром Маха–Цендера является перспективным для количественного измерения

профилей разрывных акустических волн в воздухе и калибровки широкополосных микрофонов.

2. Определены соотношения между углом падения и амплитудой  $N$ -волны, при которых наблюдается нерегулярный режим отражения сферически расходящейся  $N$ -волны от плоской жесткой поверхности в воздухе.

3. Развита численная модель нелинейной фокусировки разрывных периодических и импульсных полей позволяет описывать пространственно-временную структуру и оценивать уровни насыщения в аксиально-симметричных акустических пучках.

4. Рассчитаны акустические поля современных диагностических (решетка Philips C5-2) и ударно-волновых (Duolith SD1) медицинских излучателей для различных режимов их работы. Выполненные расчеты могут использоваться для оптимизации параметров ультразвуковых излучателей в различных медицинских приложениях и для разработки оптимальных протоколов облучения.

### **Апробация работы**

Основные результаты исследований, представленных в диссертации, докладывались и обсуждались на следующих профильных научных российских и международных конференциях: на 162, 166, 168 и 169-й сессиях Американского акустического общества (Сан-Диего, 2011; Сан-Франциско, 2013; Индианаполис, 2014; Джэксонвилл, США, 2015), на XII Всероссийской школе-семинаре «Волновые явления в неоднородных средах» (Звенигород, 2010), на Всероссийской школе-семинаре «Волны-2013» (Красновидово, 2013), на Международном конгрессе по ультразвуку (Гданьск, Польша, 2011), на XIV и XV сессиях Российского акустического общества (Саратов, 2011; Таганрог, 2012), на совместной конференции Французского акустического общества и Европейской ассоциации акустиков «Акустика-2012» (Нант, Франция, 2012), на 21-ом Международном конгрессе по акустике (ISA21, Монреаль, Канада, 2013), на 3, 4 и 5-й Международных школах по терапевтическому ультразвуку (Лез Уш, Франция, 2011, 2013, 2015), на Летней школе по нелинейной акустике и неоднородным средам (Олерон, Франция, 2014), на 1-й Всероссийской акустической конференции (Москва, 2014), на XXII Международной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых "Ломоносов-2015" (Москва, 2015), на 20-ом Международном симпозиуме по нелинейной акустике (ISNA20, Лион, Франция, 2015), а также обсуждались на научных семинарах кафедры акустики физического факультета МГУ и Акустического института имени академика Н.Н. Андреева.

### **Изложение материалов диссертации в публикациях:**

Материалы диссертации опубликованы в 24 печатных работах, в том числе в 10 статьях в научных изданиях из списка ВАК РФ и в 14 публикациях в сборниках трудов международных и российских конференций. Представленные в диссертации результаты изложены в следующих статьях:

1. М.М. Карзова, М.В. Аверьянов, О.А. Сапожников, В.А. Хохлова. Механизмы насыщения нелинейных импульсных и периодических сигналов в фокусированных акустических пучках // Акуст. журн. 2012. Т.58, №1, С.93-102.
2. С. Perez, Н. Chen, Т. J. Matula, М. М. Karzova, V. A. Khokhlova. Acoustic field characterization of the Duolith: Measurements and modeling of a clinical shockwave therapy device // J. Acoust. Soc. Am. 2013. 134(2), P. 1663-1674.

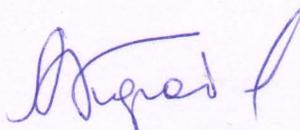
3. M. Karzova, V.A. Khokhlova, C. Perez, T.J. Matula. Temporal and spatial characteristics of nonlinear acoustic field generated by an extracorporeal shockwave therapy device: modeling and measurements // POMA 2013. Vol. 19, P. 075100.
4. M. Karzova, P. Yuldashev, V. Khokhlova, S. Ollivier, E. Salze, Ph. Blanc-Benon. Characterization of spark-generated *N*-waves in air using an optical schlieren method // J. Acoust. Soc. Am. 2015. 137(6), P.3244-3252.
5. M. Karzova, V. Khokhlova, S. Ollivier, E. Salze, Ph. Blanc-Benon. Mach stem formation for acoustic weak shock waves: experiment and numerical modeling // J. Acoust. Soc. Am. 2015. EL436, P.436-442.
6. P. Yuldashev, M. Karzova, V. Khokhlova, S. Ollivier, Ph. Blanc-Benon. Measurements of spark-generated spherical *N*-waves in air using the Mach-Zehnder interferometer and calibration of condenser microphones // J. Acoust. Soc. Am. 2015. 137(6), P. 3314-3324.
7. М.М. Карзова, П.В. Юлдашев, В.А. Хохлова, С. Оливье, Ф. Блан-Бенон. Использование интерферометра Маха-Цендера для экспериментального исследования образования «ножки» Маха при отражении ударноволновых импульсов от жесткой поверхности // Известия РАН. Серия физическая. 2015. Т. 79, №10, С. 1452-1455.
8. S. Ollivier, C. Desjouy, P.V. Yuldashev, A. Koumela, E. Salze, M. Karzova, L. Rufer, Ph. Blanc-Benon. High frequency calibration of MEMS microphones using spherical *N*-waves // AIP Conf. Proc. 2015. 1685, P. 030011.
9. M. Karzova, P. Yuldashev, S. Ollivier, V. Khokhlova and Ph. Blanc-Benon. Nonlinear reflection of a spherically divergent *N*-wave from a plane surface: Optical interferometry measurements in air // AIP Conf. Proc. 2015. 1685, P. 090011.
10. M. Karzova, B. Cunitz, P. Yuldashev, Y. Andriyakhina, W. Kreider, O. Sapozhnikov, M. Bailey and V. Khokhlova. Nonlinear effects in ultrasound fields of diagnostic-type transducers used for kidney stone propulsion: Characterization in water // AIP Conf. Proc. 2015. 1685, P. 040002.

**Личный вклад автора** заключается в выборе объектов исследования, проведении измерений, обработке экспериментальных данных с использованием методов численного моделирования, интерпретации полученных результатов. Содержание диссертации и основные положения, выносимые на защиту, отражают персональный вклад автора в опубликованные работы. Результаты, представленные в диссертации М.М. Карзовой, являются оригинальными и получены автором самостоятельно.

Диссертация «Нелинейные эффекты при отражении и фокусировке разрывных акустических волн в задачах атмосферной и медицинской акустики» Карзовой Марии Михайловны обсуждена на заседании кафедры акустики физического факультета Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова» «18» ноября 2015 г. (протокол №13) и рекомендуется к защите на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.06 – акустика.

Присутствовало на заседании 19 чел. Результаты голосования: «за» – 19 чел., «против» – 0 чел., «воздержалось» – 0 чел., протокол № 13 от «18» ноября 2015 г.

И.о. заведующего кафедрой акустики  
профессор, доктор физ.-мат. наук



А.И. Коробов

Ученый секретарь кафедры акустики  
ст. научн. сотр., кандидат физ.-мат. наук



Н.И. Одина