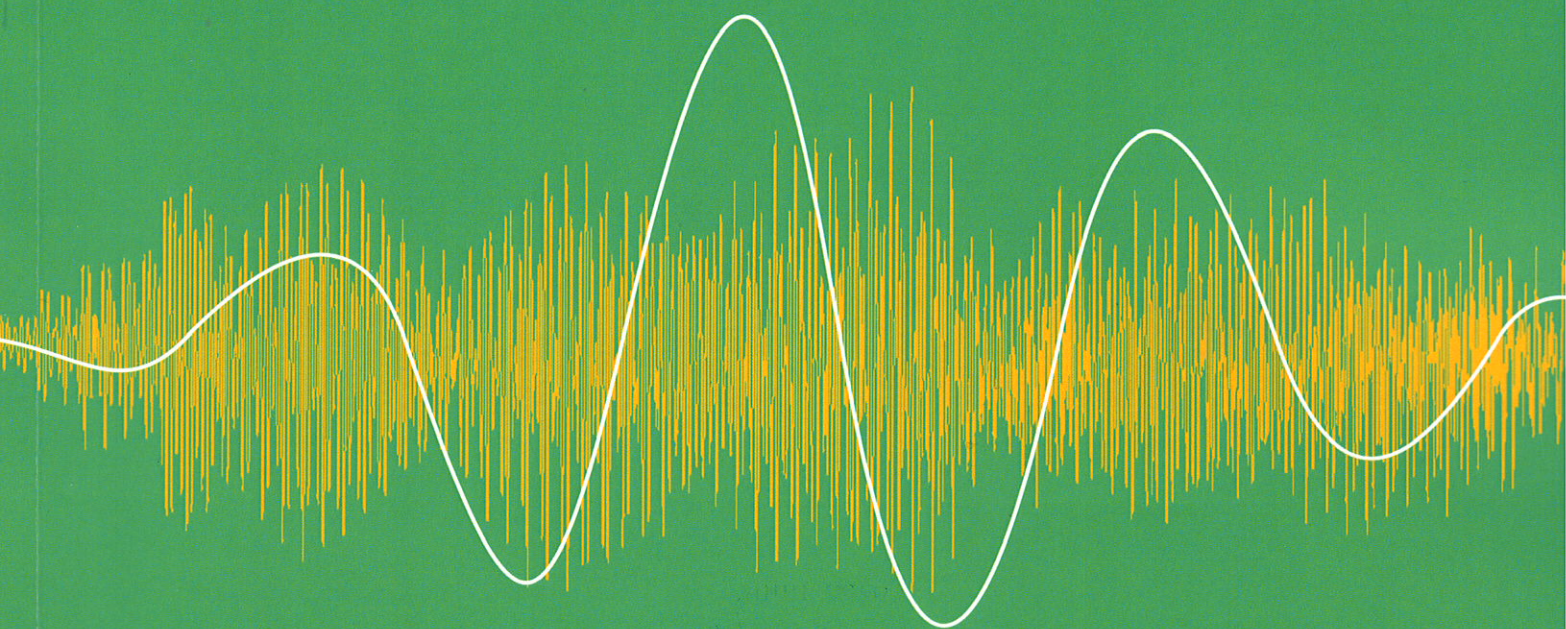


# XXXII ПРОГРАММА И АННОТАЦИИ ДОКЛАДОВ

XXXII СЕССИИ  
РОССИЙСКОГО АКУСТИЧЕСКОГО ОБЩЕСТВА





## Секция БИО –Биоакустика и медицинские приложения акустических методов

Бибиков Николай Григорьевич, руководитель  
АО «Акустический институт им.акад.Н.Н. Андреева»  
117036, Москва, ул. Шверника, д.4; E-mail: nbibikov1@yandex.ru

17.10.2019 - с 14.00 до 18.30; 18.10.2019 - с 09.00 до 13.00

### ПЛЕНАРНЫЙ ДОКЛАД

#### НОВЫЕ ПОДХОДЫ В НЕИНВАЗИВНОЙ ХИРУРГИИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ФОКУСИРОВАННОГО УЛЬТРАЗВУКА ВЫСОКОЙ ИНТЕНСИВНОСТИ

Хохлова В.А.

Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, физический факультет, Москва  
Тел. (495 9392952); E-mail: vera@acs366.phys.msu.ru

Фокусированный ультразвук высокой интенсивности (в англоязычной литературе – high intensity focused ultrasound, HIFU) на сегодняшний день уже успешно используется в клинической практике для воздействия на биологические ткани с целью безоперационного разрушения новообразований в различных органах и проведения нейрохирургических операций в глубоких структурах мозга человека.

Хотя в современных HIFU системах основным механизмом воздействия на ткань является ее нагрев в режиме фокусировки гармонических волн, растет интерес к использованию импульсных режимов воздействия с большой пиковой амплитудой, когда в профиле волны в фокусе образуются высокоамплитудные ударные фронты. Такие режимы позволяют существенно расширить круг вызываемых ультразвуком биоэффектов. Быстро развиваются новые приложения, такие как разрушение тромбов и объемных гематом, усиление выделения специфических биомаркеров для проведения неинвазивной онкодиагностики, адресная доставка лекарств, лечение абсцесса, комбинированная иммунотерапия.

В докладе представлены результаты недавних исследований в данной области, направленные на развитие технологии механического разрушения ткани на субклеточные составляющие (гистотрипсия), усиление адресной доставки лекарств без искусственного введения контрастных агентов, а также повышение эффективности и безопасности теплового воздействия. Приводится обзор современных клинических приложений в урологии, кардиологии, гастроэнтерологии, биоинженерии и иммунологии, в которых ведутся исследования по использованию ударно-волновых режимов облучения. Рассматриваются новые экспериментальные и численные методы характеристики ударно-волновых полей HIFU-установок и планирования облучения в определенных клинических условиях; приводятся примеры излучателей, позволяющих достичь необходимых амплитуд ударного фронта в фокусе; обсуждаются физические механизмы механического и теплового воздействия на ткань, кавитационные эффекты в ткани при ее облучении ультразвуком с ударными фронтами, влияние акустических свойств ткани на нелинейную фокусировку и параметры поля *in situ*; особенности акустической и МРТ визуализации области воздействия, особенности морфологических и ультраструктурных изменений ткани, вносимых ультразвуком.

Представленные результаты используются в научных центрах, компаниях и медицинских лабораториях в России и за рубежом для развития новых технологий и клинических приложений неинвазивной ультразвуковой хирургии.

**Ключевые слова:** медицинская акустика, неинвазивная ультразвуковая хирургия, фокусированный ультразвук, нелинейные эффекты, ударный фронт

#### РАЗРАБОТКА МАКСИМАЛЬНО ПЛОТНОЙ МНОГОЭЛЕМЕНТНОЙ УЛЬТРАЗВУКОВОЙ РЕШЕТКИ ДЛЯ РЕАЛИЗАЦИИ УДАРНО-ВОЛНОВЫХ РЕЖИМОВ ОБЛУЧЕНИЯ ГОЛОВНОГО МОЗГА

Росницкий П.Б.<sup>1)</sup>, Сапожников О.А.<sup>1)</sup>, Юлдашев П.В.<sup>1)</sup>, Гаврилов Л.Р.<sup>2)</sup>, Хохлова В.А.<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup>Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, физический факультет, Москва

<sup>2)</sup>АО «Акустический институт им. акад. Н.Н. Андреева», Москва  
Тел. (495 9392952); E-mail: pavrosni@yandex.ru

Многоэлементные фазированные решетки получили широкое применение в хирургии для создания объемных разрушений в глубоких структурах головного мозга с использованием мощного сфокусированного ультразвука. При непрерывном облучении гармоническими волнами, такой способ может привести к побочным эффектам перегрева костей черепа и тканей, находящихся на пути пучка. Альтернативой может служить метод гистотрипсии с кипением (ГК), в котором облучение ведется миллисекундными нелинейными импульсами с амплитудой разрыва в фокусе >60 МПа, следующими с коэффициентом заполнения <1%. Метод ГК позволяет механически разрушить ткань практически без тепловых эффектов. Однако существующие полусферические клинические решетки не позволяют реализовать ГК, поскольку при такой геометрии нелинейные эффекты выражены слабо.

Целью работы было создание математической модели решетки, способной реализовать ГК внутри мозга с учетом существующих на сегодняшний день технологических ограничений на максимальную интенсивность на элементах решетки (40 Вт/см<sup>2</sup>).



Предложена модель 256-элементной решетки с рабочей частотой 1 МГц в форме сферического сегмента с апертурой и радиусом кривизны равными 20 см. При разбиении решетки на элементы использован новый метод максимально плотного заполнения ее поверхности хаотически расположенными многоугольниками одинаковой площади. Для расчета поля разработан численный алгоритм, основанный на комбинации трех различных моделей: аналитического метода вычисления интеграла Рэлея в согласующей жидкости вне головы, линейного волнового уравнения в модели Кельвина-Фойгта для учета сдвиговых волн в неоднородном по толщине черепе и нелинейного уравнения Вестервелта в однородных поглощающих тканях мозга. На основе предложенных моделей разработан алгоритм компенсации aberrаций, вызванных наличием черепа. Модель акустических свойств головы получена путем сегментации изображений МРТ.

В работе показано, что предложенная решетка в случае компенсации aberrаций позволяет избавиться от искажения пучка и обеспечить нелинейный режим облучения в фокусе с амплитудой разрыва  $>60$  МПа. При этом интенсивность на элементах решетки не превышает технологический максимум ( $40 \text{ Вт/см}^2$ ), а значит предложенная решетка применима для реализации ГК. Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 19-02-00035/19, стипендии фонда развития теоретической физики «Базис» и стипендии Президента РФ СП-2644.2018.4.

**Ключевые слова:** медицинская акустика, ультразвуковая хирургия, головной мозг, многоэлементные решетки, ударный фронт

### **HFU BEAM: ПРОГРАММНЫЙ КОМПЛЕКС С ГРАФИЧЕСКИМ ИНТЕРФЕЙСОМ ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ СФОКУСИРОВАННЫХ АКСИАЛЬНО-СИММЕТРИЧНЫХ УЛЬТРАЗВУКОВЫХ ПУЧКОВ В СЛОИСТО-НЕОДНОРОДНОЙ НЕЛИНЕЙНОЙ СРЕДЕ**

Юлдашев П.В.<sup>1)</sup>, Карзова М.М.<sup>1)</sup>, Мездрохин И.С.<sup>1)</sup>, Росницкий П.Б.<sup>1)</sup>, Сапожников О.А.<sup>1)</sup>, Хохлова В.А.<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup>Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, физический факультет, Москва  
Тел. (495 9392952); E-mail: petr@acs366.phys.msu.ru

Для реализации неинвазивного хирургического воздействия ультразвукового пучка на различные органы применяются излучатели различной геометрической формы, размера и мощности. Фокусировка пучка при этом обычно обеспечивается выбором поверхности излучателя в виде сегмента сферической поверхности заданного радиуса кривизны. К таким излучателям относятся, например, одноэлементные преобразователи, многоэлементные кольцевые решетки или рандомизированные решетки с элементами различной геометрической формы. Во многих случаях поле таких многоэлементных излучателей при фокусировке в центр кривизны может быть с высокой точностью аппроксимировано полем одноэлементного сферического излучателя. Для планирования воздействия сфокусированного ультразвука на организм и обеспечения безопасности и эффективности такого воздействия общей задачей является определение параметров ультразвукового поля различной мощности при распространении как в воде, так и в ткани. Для решения этой задачи часто применяется численное моделирование ультразвуковых пучков на основе уравнений нелинейной акустики.

Целью работы было создание программы с графическим интерфейсом, предназначенной для моделирования нелинейных полей, создаваемых осесимметричными ультразвуковыми излучателями на основе параболического уравнения (ХЗК) и широкоугольного параболического уравнения (ШПУ) при фокусировке поля в плоскостной среде.

Графический интерфейс программы выполнен в среде MATLAB. В качестве модели излучателя используется многоэлементный преобразователь в виде сферического сегмента с кольцевыми элементами равной площади и заданным зазором между ними. Кроме геометрических параметров пользователем задаются частота и полная акустическая мощность излучателя. Также возможна фазировка элементов для электронного смещения фокуса вдоль оси пучка. В качестве модели среды распространения задается набор из плоскопараллельных слоев, ориентированных перпендикулярно оси излучателя. Для каждого слоя задаются скорость звука, плотность, коэффициент нелинейности, а также параметры термовязкого и степенного закона поглощения, характерного для биологических тканей. Уравнения ХЗК и ШПУ решаются численно с использованием метода расщепления по физическим факторам и различных конечно-разностных схем для операторов дифракции, нелинейности и поглощения. В программе обеспечивается вывод и просмотр результатов моделирования, таких как пространственные распределения положительного и отрицательного пиковых давлений, интенсивности, мощности тепловых источников, амплитуд гармоник, а также профилей давления.

Работа выполнена при поддержке гранта РНФ №14-12-00974.

**Ключевые слова:** уравнение ХЗК, широкоугольное параболическое уравнение, ультразвуковая хирургия

### **ХАРАКТЕРИЗАЦИЯ ДВУМЕРНОЙ УЛЬТРАЗВУКОВОЙ РЕШЁТКИ МЕТОДОМ НЕСТАЦИОНАРНОЙ АКУСТИЧЕСКОЙ ГОЛОГРАФИИ**

Цысарь С.А., Николаев Д.А., Сапожников О.А.

Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, физический факультет, Москва  
Тел. +74959392952; E-mail: sergey@acs366.phys.msu.ru

Во многих областях применения ультразвука (УЗ) важное значение имеет точное знание пространственно-временной структуры акустического поля, в частности, в медицинской ультразвуковой томографии и терапии. Акустическая голография – это метод записи реальной трехмерной структуры поля путем измерения амплитуды и фазы акустического давления на двумерной поверхности, являющейся голограммой. Акустическая голография позволяет количественно определить характер колебаний поверхности УЗ преобразователя путём расчёта распределений амплитуды и фазы колебательной скорости на поверхности преобразователя из измеренной голограммы.