

УДК 577.44

© Т. Н. Пашовкин, Г. В. Шильников

РЕГИСТРАЦИЯ И АНАЛИЗ РАСПРЕДЕЛЕНИЙ ИНТЕНСИВНОСТЕЙ В УЛЬТРАЗВУКОВЫХ ПУЧКАХ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ КРАСИТЕЛЕЙ

В статье рассмотрена визуализация распределений локальных интенсивностей и кавитационных зон в ультразвуковых пучках, генерируемых ультразвуковыми преобразователями различного типа. Приведены примеры визуализации ультразвуковых полей. Показано, что из картин распределений интенсивностей в ультразвуковых пучках можно определять количественно величины средних и локальных интенсивностей.

ВВЕДЕНИЕ

Вопросы безопасного применения ультразвука в медицине для терапии (включая физиотерапию, фонофорез, гипертермию) и диагностики тесно связаны в первую очередь с постоянным метрологическим контролем распределений интенсивностей в ультразвуковых пучках. Особенно это важно в сложных ультразвуковых полях, генерируемых несколькими излучателями одновременно.

Анализ имеющегося в литературе обширного экспериментального материала по биологическим эффектам ультразвука затруднен тем, что многие авторы недостаточно внимания уделяли метрологическим вопросам. Во многих случаях трудно судить о параметрах ультразвуковых полей, вызывавших те или иные эффекты. Рассмотрение механизмов и порогов биологического действия ультразвука требует количественных данных о структуре ультразвукового поля, корректной калибровки излучателей.

Одной из важнейших характеристик воздействующего ультразвука является интенсивность, которая определяет природу первичных физических процессов (механических, тепловых, кавитационных) в биологических объектах, находящихся в ультразвуковом пучке. Преобладание какого-либо из перечисленных процессов будет определять первичный физический механизм биологического действия ультразвука.

Вследствие пространственной неоднородности ультразвуковых полей локальные интенсивности для плоских излучателей могут превышать средние в несколько раз. Для терапии это является существенным фактом, и при выборе параметров ультразвукового воздействия на конкретный объект необходимо учитывать отношение пиковых интенсивностей к средним, пространственное распределение интенсивностей в различных сечениях ультразвукового пучка. Поэтому метрологическое

обеспечение воздействующего ультразвука имеет важное значение. Как правило, большинство исследователей не имеют простых и быстрых методов постоянного контроля ультразвуковых полей, тем более для широко применяемых в медицине ультразвуковых аппаратов. Кроме того, следует отметить, что задача экспресс-визуализации тонкой структуры распределений интенсивностей в ультразвуковых пучках до настоящего дня не решена ни в одной акустической лаборатории мира. Имеющиеся методы и аппаратура сложны, трудоемки и дают приближенные, малонаглядные результаты. Поэтому разработка наиболее простых и быстрых методов визуализации ультразвуковых полей является необходимым условием постоянного контроля за состоянием ультразвуковой аппаратуры и оперативного устранения неисправностей, разработки новых типов ультразвуковых излучателей для терапии, для выбора наиболее оптимальных режимов ультразвукового воздействия, связанных с пространственным распределением интенсивностей.

Существующие методы измерения параметров ультразвуковых полей обладают рядом серьезных недостатков. Они либо интегральны (дают информацию о средних интенсивностях, но не учитывают пространственное распределение локальных интенсивностей ультразвука), либо позволяют проводить только локальные измерения (термопары, термисторы, гидрофоны), либо требуют сложной и дорогостоящей аппаратуры, доступной крайне ограниченному кругу исследователей [1–3, 4, 5].

Хорошо известно физическое явление — возникновение в ультразвуковых полях постоянной силы — радиационного давления, действующего на препятствия. Радиационное давление может быть измерено с большой точностью весовыми методами, и оно однозначно связано с параметрами акустического поля, что применяется для изме-

рений параметров, например интенсивности ультразвуковых полей. Недостатком весовых методов измерения интенсивности ультразвука является зависимость показаний от формы фронта волн, падающих на отражающий рефлектор. При уменьшении поперечных размеров источника ультразвука наблюдаются сильные искривления фронтов волн и существенно растет ошибка измерения. В настоящее время одним из наиболее широко применяемых методов при калибровке терапевтических аппаратов является метод измерения интенсивности ультразвука по радиационному давлению с помощью измерителей мощности ультразвука типа ИМУ-3 [6–9].

Этих недостатков лишены калориметрические методы. Однако точность измерения мощностей терапевтического диапазона существенно затруднена по другим причинам. От термометрических устройств при измерении даже средних (до 1 Вт) уровней мощности ультразвука требуется точность измерений в сотые и тысячные доли градуса. Эти недостатки были преодолены с помощью измерений теплосодержания жидкости, заключенной в замкнутую теплоизолированную оболочку. Тем не менее калориметрические методы остались интегральными, не дающими картину распределений интенсивности в ультразвуковых пучках.

Измерения с помощью гидрофонов также имеют ряд недостатков, в первую очередь обусловленных конечностью их размеров. При этом они интегрируют акустическое давление по своей апертуре, а не измеряют его в точке [4].

Измерения параметров ультразвукового пучка с помощью термопар применяется в калориметрических методах измерения. Кроме того, применение дифференциальных термопар (один из спаев покрывается поглощающим ультразвук веществом) может при одновременном помещении двух точечных спаев в поле дать картину локального изменения интенсивностей за счет разницы разогревов спаев. В терапевтическом диапазоне интенсивностей (до 3 Вт/см^2) сохраняется линейная зависимость разности температур спаев от интенсивности. Однако для получения полной картины структуры ультразвуковых полей требуется длительное время для сканирования в различных сечениях ультразвуковых пучков. Кроме того, этим методом невозможно выявить тонкую структуру полей вследствие конечного размера термопар и поглощающего слоя.

Качественно распределение энергии в ультразвуковом пучке можно оценить, используя ряд методов, например оптические, термографические, жидкокристаллические, химические. Однако практически все эти методы являются либо крайне дорогостоящими, либо имеют большое время определения и регистрации этих распределений.

Кроме того, все они дают приближенные и мало-наглядные результаты. В связи с этим нами был разработан и применен для контроля ультразвуковых полей, используемых в наших исследованиях, наиболее простой в настоящее время метод контроля распределений интенсивностей в ультразвуковых пучках, генерируемых пьезопреобразователями различного типа, работающими на различных частотах [10]. В качестве индикатора в данном способе используются красители, например метиленовый синий, малахитовый зеленый и ряд других. В качестве индикаторных пластин можно использовать любой тип бумаги. Распределение энергии в заданных сечениях ультразвуковых пучков получают через 5–60 с после включения генератора в зависимости от интенсивности ультразвука.

МЕТОД ВИЗУАЛИЗАЦИИ УЛЬТРАЗВУКОВЫХ ПОЛЕЙ

Визуализация ультразвуковых полей (распределения интенсивности ультразвука в ультразвуковом пучке) проводилась с использованием метода, разработанного авторами данной работы, заключающегося в том, что в растворах различных красителей (метиленового синего, малахитового зеленого и др.) помещали индикаторную пластинку, в качестве которой использовалась бумага различных типов, в растворе возбуждался ультразвук, и через несколько секунд в зависимости от интенсивности ультразвука на индикаторной пластине появлялось изображение распределения интенсивности, например, в ближней, начале дальней зоны излучателей различного типа (плоских, фокусирующих, одного или нескольких излучателей) [10–13]. Этот метод позволяет также получить объемную картину распределения кавитирующих пузырьков в поле низкочастотных магнестрикционных излучателей.

Для проведения визуализации ультразвукового поля готовили растворы красителей с концентрацией 50 мг/л. Размещали в растворе индикаторные пластины из пористого материала (бумаги, картона, хлопчатобумажной ткани) и возбуждали в растворе ультразвуковые колебания. Вследствие увеличения скорости диффузии молекул красителя в материал индикаторной пластины, различной в разных точках поля и коррелирующей с локальной энергией в различных точках поля, получали изображение и по полученному изображению наблюдали распределение интенсивности в различных сечениях ультразвукового пучка. Исследования, проведенные в кювете с пьезопреобразователями от терапевтического генератора «Ультразвук Т-5», УЗТ-1.01Ф с частотой 0.88 МГц, УЗТ-3.04 Д

с частотой 2.64 МГц при расположении индикаторной пластины размером 5×6 см параллельно поверхности пьезопреобразователя на расстоянии 2 см в растворе метиленового синего с концентрацией 50 мг/л, показали, что временное разрешение способа составляет при средней по пространству и времени интенсивности $I_{SATA} = 0.05 \text{ Вт/см}^2$ — 30 с, а при интенсивности $I_{SATA} = 1.0 \text{ Вт/см}^2$ — 5 с. В одном объеме 1 л красителя можно качественно зафиксировать до 500 изображений.

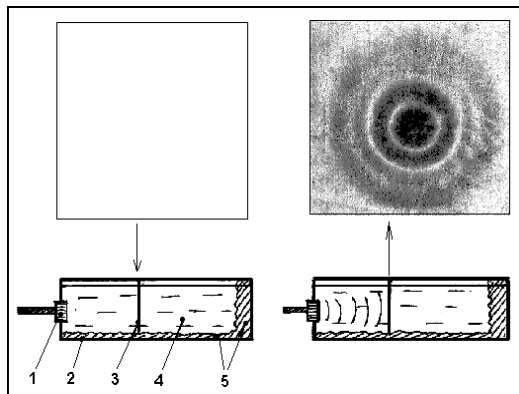


Рис. 1. Схема получения изображений, отражающих распределение интенсивностей в сечении ультразвукового пучка: 1 — излучатель, 2 — кювета, 3 — индикаторная пластина, 4 — раствор красителя, 5 — поглотители ультразвука

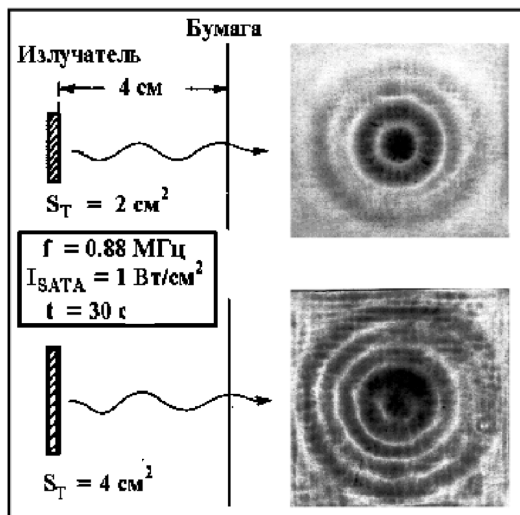


Рис. 2. Распределение интенсивности ультразвука в сечении поля плоского излучателя площадью $S_T = 2$ и 4 см^2 на расстоянии 4 см от поверхности излучателя (ближняя зона излучателя) при интенсивности $I_{SATA} = 1.0 \text{ Вт/см}^2$. Частота $f = 0.88 \text{ МГц}$

ВИЗУАЛИЗАЦИЯ РАСПРЕДЕЛЕНИЙ ИНТЕНСИВНОСТЕЙ В УЛЬТРАЗВУКОВЫХ ПУЧКАХ

Схема получения изображений и примеры регистрации распределений интенсивности в ультразвуковых полях различных пьезопреобразователей, работающих на различных частотах приведены на рис. 1–9.

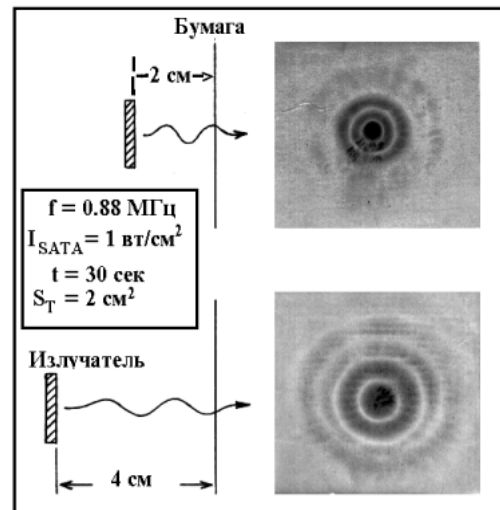


Рис. 3. Распределение интенсивности ультразвука в сечении поля плоского излучателя, площадью $S_T = 2 \text{ см}^2$ на расстоянии 2 см и 4 см от поверхности излучателя (ближняя зона излучателя) при интенсивности $I_{SATA} = 1.0 \text{ Вт/см}^2$. Частота $f = 0.88 \text{ МГц}$

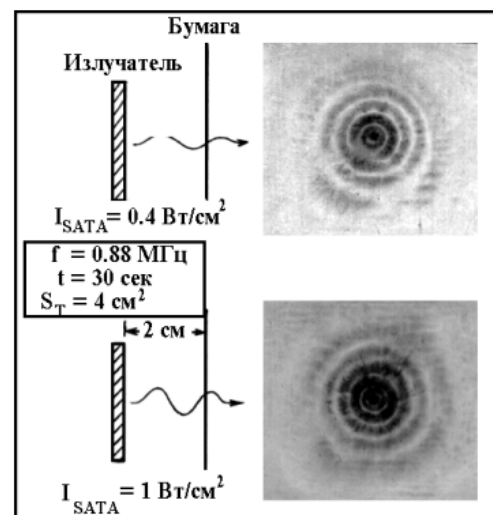


Рис. 4. Распределение интенсивности ультразвука в сечении поля плоского излучателя площадью $S_T = 4 \text{ см}^2$ на расстоянии 2 см от поверхности излучателя (ближняя зона излучателя) при интенсивностях $I_{SATA} = 0.4$ и 1.0 Вт/см^2 . Частота $f = 0.88 \text{ МГц}$

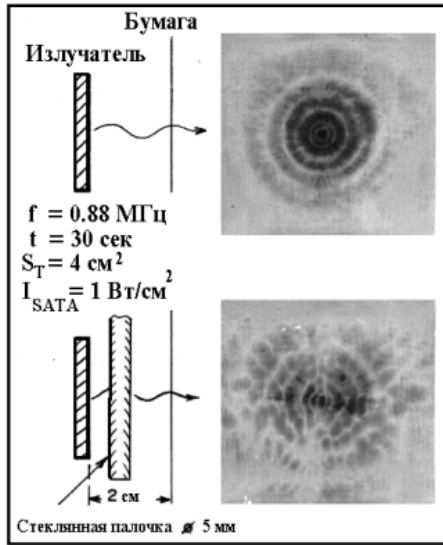


Рис. 5. Распределение интенсивности ультразвука в сечении поля плоского излучателя площадью $S_T = 4 \text{ см}^2$ на расстоянии 2 см от поверхности излучателя (ближняя зона излучателя) при интенсивности $I_{SATA} = 1.0 \text{ Вт/см}^2$ и при наличии отражающей неоднородности между излучателем и индикаторной поверхностью. Частота $f = 0.88 \text{ МГц}$

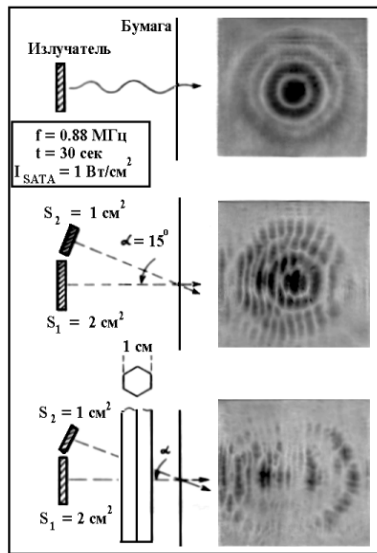


Рис. 6. Распределение интенсивности ультразвука в сечении поля плоского излучателя площадью 2 см^2 на расстоянии 4 см от поверхности излучателя (ближняя зона излучателя) при интенсивности $I_{SATA} = 1.0 \text{ Вт/см}^2$; в сечении поля двух плоских излучателей площадью $S_1 = 2 \text{ см}^2$ и $S_2 = 1 \text{ см}^2$, расположенных под углом 15° друг к другу; при наличии отражающей неоднородности между излучателями и индикаторной поверхностью. Частота $f = 0.88 \text{ МГц}$

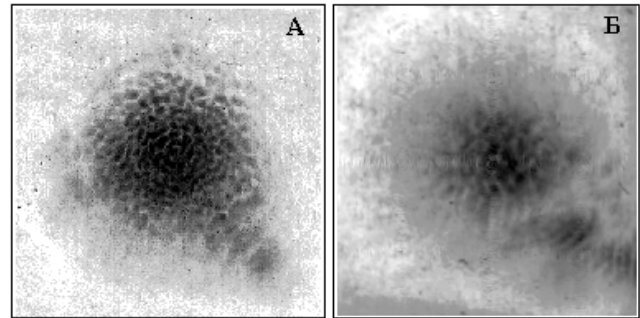


Рис. 7. Распределение интенсивности ультразвука в поле плоского излучателя площадью $S_T = 2 \text{ см}^2$ на расстоянии 1 см (А) и 3 см (Б) от поверхности излучателя (ближняя зона излучателя). Частота $f = 2.64 \text{ МГц}$, интенсивность 1 Вт/см^2

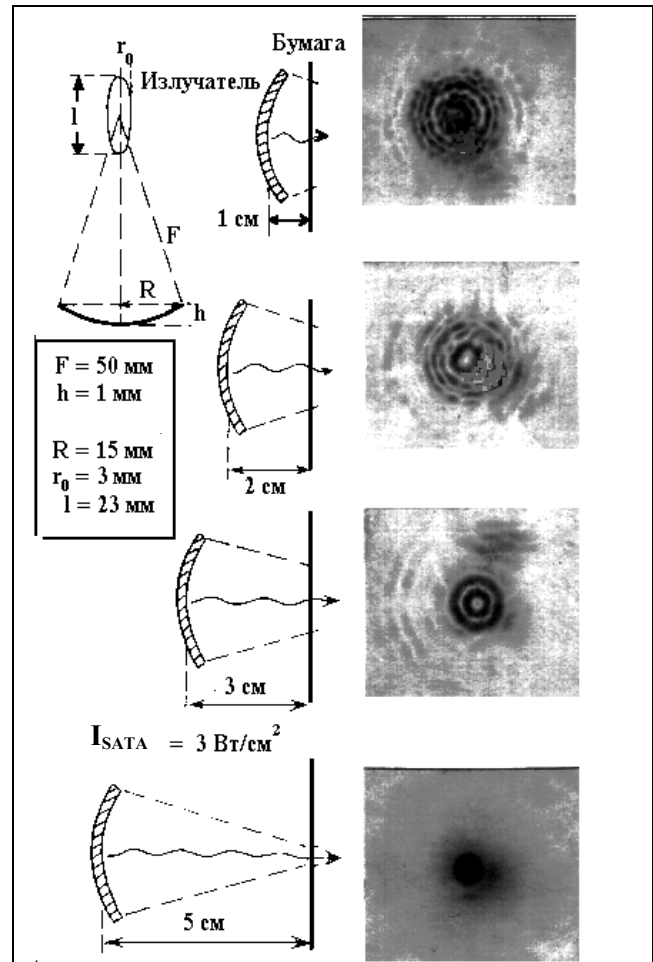


Рис. 8. Распределение интенсивности ультразвука в поле фокусирующего излучателя площадью 4 см^2 в различных сечениях ультразвукового пучка. Частота $f = 0.88 \text{ МГц}$, r_0 — радиус фокального пятна, l — длина фокального пятна

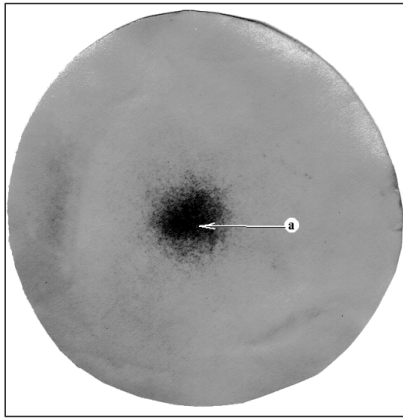


Рис. 9. Распределение кавитационных микропузырьков в поле низкочастотного излучателя ультразвука на расстоянии 1 см от излучателя. Частота 22 кГц. Амплитуда колебаний излучателя — 30 мкм, $t = 10$ с

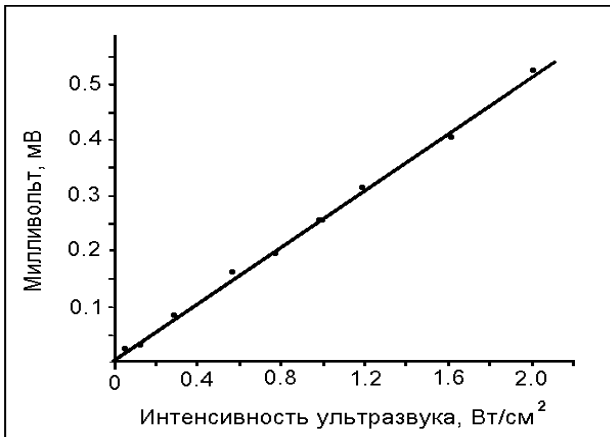


Рис. 10. Зависимость термо-ЭДС от средней по пространству и времени интенсивности ультразвука при калибровке дифференциальной термопары

Видно изменение структуры поля на различных расстояниях от излучателя, различие в структуре поля для излучателей с различными площадями, при работе двух излучателей, при помещении между излучателями и регистрирующей поверхностью отражающих ультразвук предметов, изменение структуры поля в различных сечениях фокусирующих пьезопреобразователей, прокрашивание за счет распределения кавитационных пузырьков при работе низкочастотных излучателей.

КОЛИЧЕСТВЕННАЯ ОЦЕНКА ЛОКАЛЬНЫХ И СРЕДНИХ ИНТЕНСИВНОСТЕЙ В СЕЧЕНИЯХ УЛЬТРАЗВУКОВЫХ ПУЧКОВ

Для определения соответствия изменений интенсивности в сечениях ультразвуковых пучков с картинами распределений интенсивности, полученными с помощью красителей, были проведены сканирования сечений ультразвуковых пучков на расстоянии, соответствующем расположению индикаторной пластинки, с помощью дифференциальной термопары, калиброванной по интенсивности. Метод основан на помещении термопары, один спай которой покрыт слоем поглощающего ультразвук вещества, в облучаемый раствор. За счет дифференциальности не требуется фиксировать температуру одного из спаев. В диапазоне средних по пространству и времени интенсивностей ультразвука $0-2$ Вт/см² сохраняется линейная зависимость ЭДС термопары от интенсивности ультразвука (рис. 10). Измерение средних по пространству и времени интенсивностей ультразвука проводилось весовым методом. Пример распределения интенсивности в сечениях ультразвуковых пучков, измеренного с помощью дифференциальной термопары, показан на рис. 11.

Из рисунка видно, что изменению плотности окраски соответствует изменение интенсивности (чем выше интенсивность, тем выше плотность прокрашивания).

Результаты исследований физических процессов, обуславливающих визуализации ультразвуковых полей методом краска-бумага, отражены в работе [14]. Можно лишь отметить, что в основе физических процессов визуализации лежит микрокавитация. Рис. 12 отражает распределение кавитационных микропузырьков в сечении ультразвукового пучка, при котором наблюдаются кольцевые зоны, аналогичные полученным с использованием красителя, с той разницей что кавитационные пузырьки располагаются в узлах давления, что соответствует на картинах с красителями участкам с минимальным прокрашиванием, так как большие микропузырьки являются отражателями ультразвуковых волн.

Дальнейшая разработка метода привела к возможности определения локальных интенсивностей ультразвука непосредственно из картин распределений интенсивностей в сечении ультразвукового пучка путем привязки оптических плотностей к серой шкале с использованием сканеров и ЭВМ (рис. 13).

В общем случае интенсивность прокрашивания зависит от целого ряда параметров: времени воздействия (t), температуры (T), типа красителя (K), типа индикаторной пластинки (P), концентрации красителя (C), интенсивности ультразвука (I_{ys}),

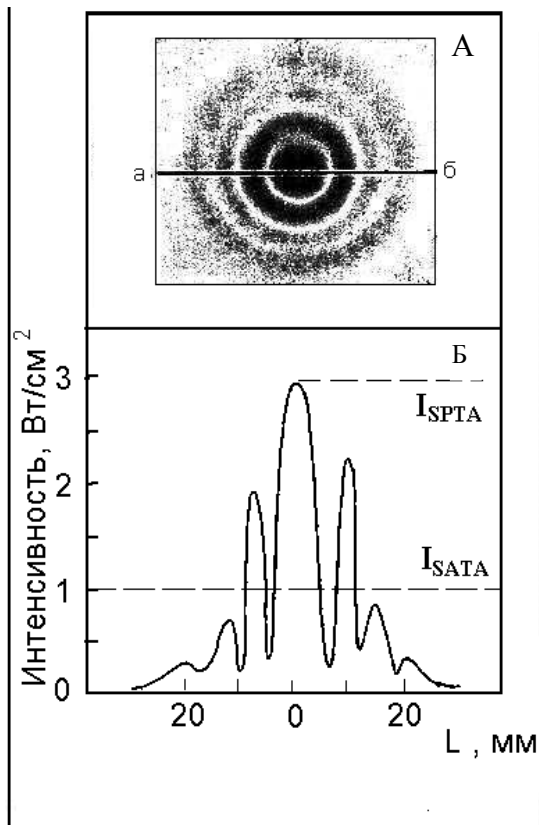


Рис. 11. Сопоставление данных: А — картина окраски на индикаторной пластине, нормальной к излучению на расстоянии 4 см от излучателя; Б — распределение интенсивности по диаметральной линии а – б сечения ультразвукового пучка, полученное с помощью дифференциальной термопары. $I_{SATA} = 1 \text{ Вт/см}^2$, $f = 0.88 \text{ МГц}$. L — радиальное смещение термопары; I_{SATA} — средняя по пространству и времени, I_{SPTA} — пиковая по пространству и средняя по времени интенсивности ультразвука

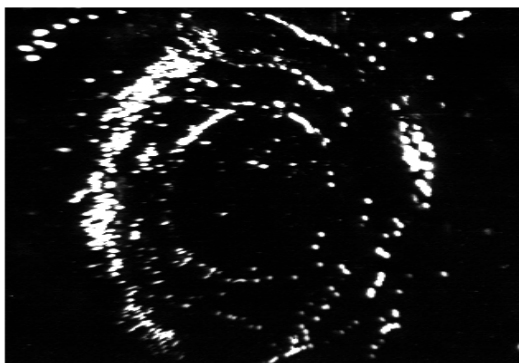


Рис. 12. Картина распределения микропузырьков при интенсивности ультразвука (средней по пространству и времени — I_{SATA}) 0.6 Вт/см^2

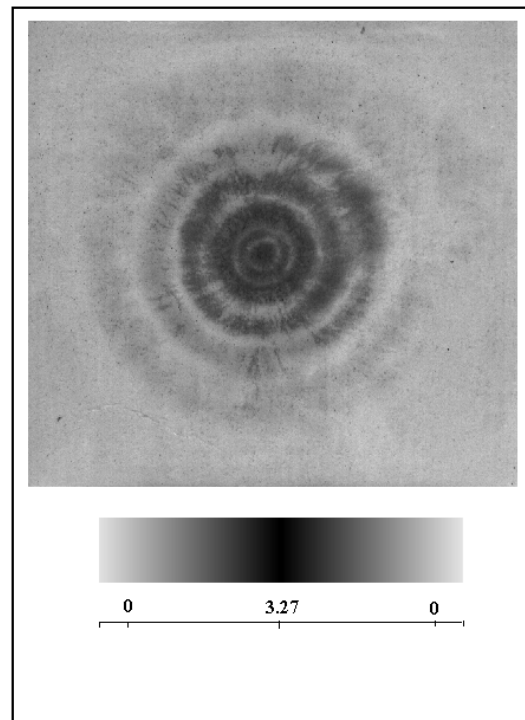


Рис. 13. Приведенные к серой шкале значения оптических плотностей в зависимости от интенсивности ультразвука (пиковой) (от 0 до 3.27 Вт/см^2) и распределение оптических плотностей в сечении ультразвукового пучка при средней интенсивности ультразвука 1 Вт/см^2 . Пиковое значение в центре распределения соответствует 2.5 Вт/см^2

расстояния от излучателя до индикаторной пластины (d). Т.е. $I_{окр} = f(t, T, C, K, P, I_{уз}, d)$. Учет всех этих переменных крайне затруднителен. Однако, зафиксировав часть этих переменных (время воздействия — 15 с, температуру — $20 \text{ }^\circ\text{C}$, тип красителя — метиленовый синий, тип индикаторной пластинки — бумага типа Astralux или фиксирующая аналогичные картины распределений в той же шкале оптических плотностей мелованная бумага, концентрацию красителя — 50 мг/мл), можно однозначно поставить (в терапевтическом диапазоне интенсивностей ультразвука) в соответствие интенсивность прокрашивания интенсивности ультразвука.

Изменение расстояния приводит лишь к изменению картины распределения интенсивностей, не влияя на интенсивность прокрашивания, зависящую от интенсивности ультразвука. На основе предложенных авторами алгоритмов были разработаны программы для ЭВМ, позволяющие: а) зная средние интенсивности ультразвука, определять

распределение интенсивностей в профиле сечения ультразвукового пучка (определять величину пиковых интенсивностей и место их локализации); б) определяя локальную интенсивность (например, дифференциальной термопарой или соотнося с серой шкалой оптических плотностей), вычислять непосредственно из картин распределений интенсивностей в сечении ультразвукового пучка среднее значение интенсивности ультразвука с учетом фоновых значений оптических плотностей, получаемых вследствие прокрашивания индикаторных пластин без ультразвукового воздействия за одно и то же время.

На рис. 13 приведены профили распределения интенсивностей, полученные при сканировании сечения ультразвукового пучка через 20° .

Видна неоднородность распределения при вращении сечения вокруг центральной точки изображения. Поэтому приведение оптических плотностей изображения к серой шкале проводилось на основании вычисления средних интенсивностей из распределений, полученных как минимум при изменении угла сканирования на 180° (рис. 14).

Наиболее точные расчеты средних интенсивностей можно получить, используя фигуру вращения и построение трехмерной картины распределения интенсивностей в ультразвуковом пучке.

Использование метода для контроля распределений интенсивностей в поле излучателей диагностических приборов показало возможность визуализации и распределений интенсивностей

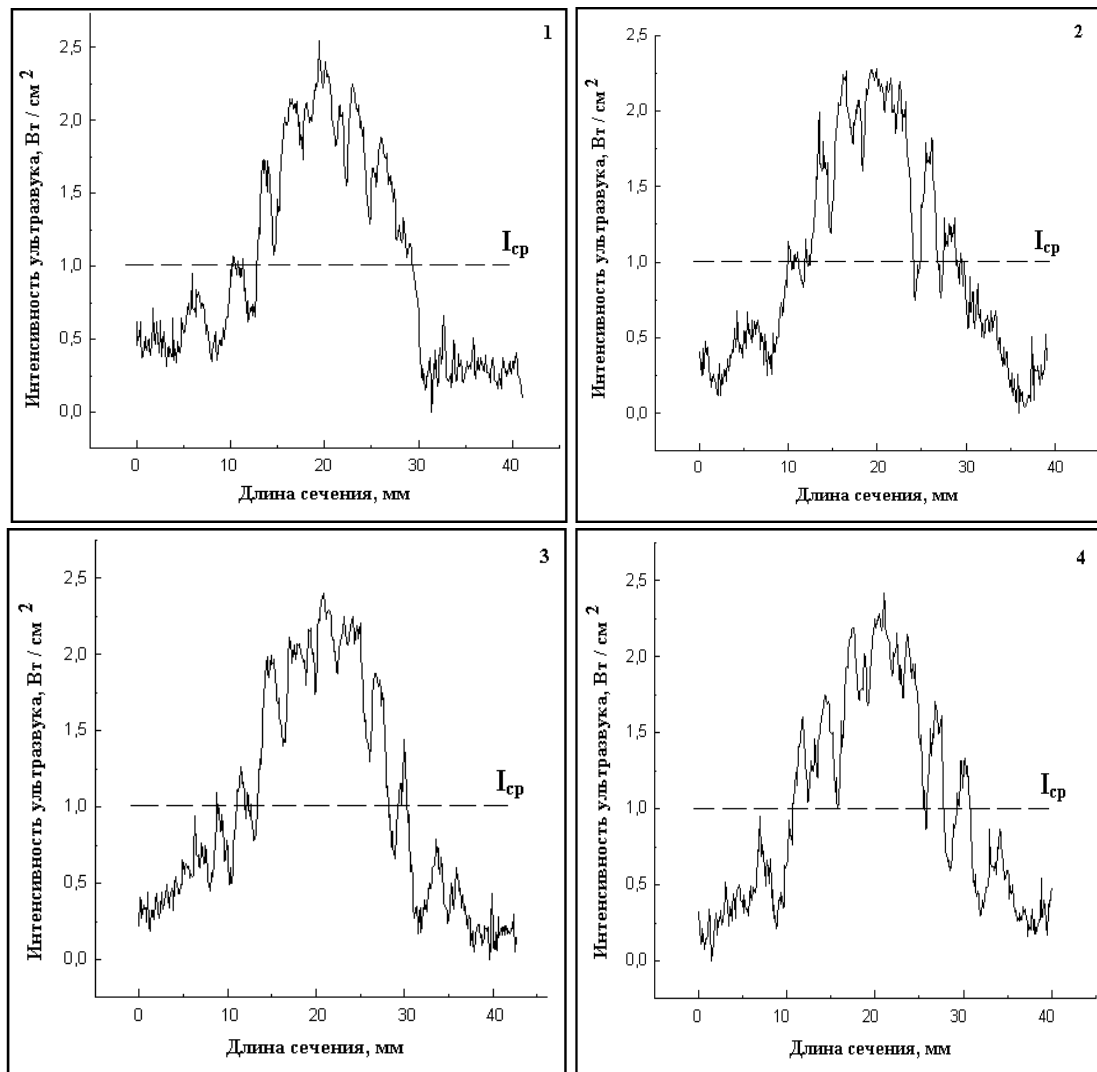


Рис. 14. Изменение профиля (1–4 из [10]) распределения интенсивности при сканировании изображения пространственного распределения интенсивностей при повороте сечения на 180° с шагом 20° (начало).

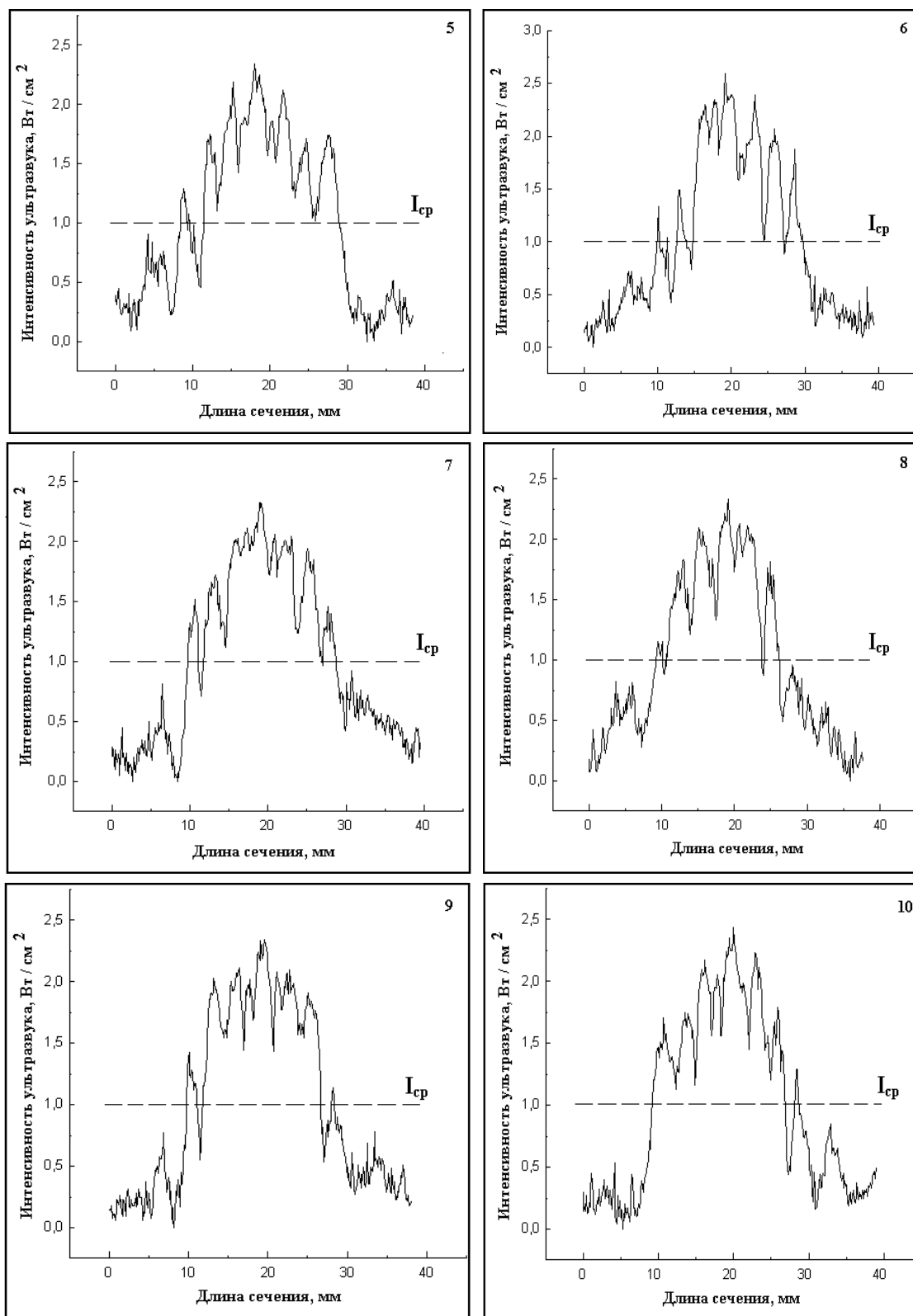


Рис. 14. Изменение профиля (5–10 из [10]) распределения интенсивности при сканировании изображения пространственного распределения интенсивностей при повороте сечения на 180° с шагом 20° (окончание)

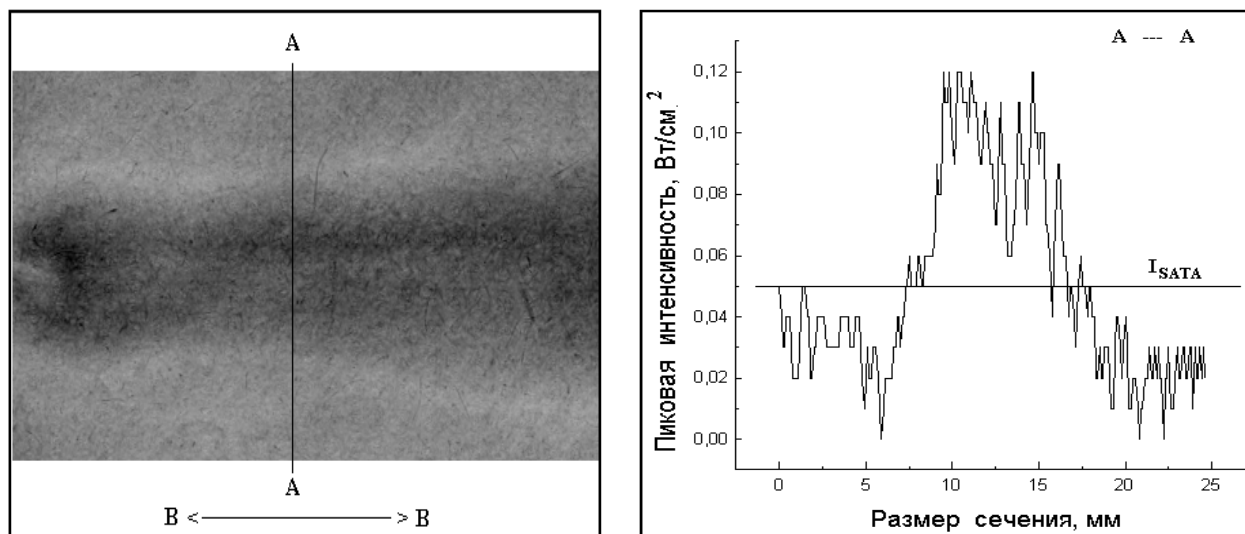


Рис. 15. Картина распределения интенсивностей в сечении ультразвукового пучка секторного датчика (сканирование в направлении В – В) и график распределения интенсивностей в сечении А – А при средней интенсивности ультразвука 50 мВт/см^2

в сечениях ультразвуковых пучков таких пьезопреобразователей. Так, на примере секторного датчика прибора для ультразвуковой диагностики ЭТС-ДМУ-02, работающего на частоте 3.5 МГц, показано распределение интенсивностей в ультразвуковом пучке на расстоянии 1 см от поверхности датчика (рис. 15) в режиме В-сканирования.

Пиковые интенсивности в ультразвуковом пучке достигали значений 0.12 Вт/см^2 . Аналогичные испытания датчиков импортных приборов в режиме В-сканирования для линейных зондов показали возможность контроля распределений интенсивности в полях таких датчиков даже в самом мягком режиме сканирования. Следовательно, для аппаратуры, работающей с более «жесткими» режимами облучения, пиковые интенсивности могут достигать предельных значений терапевтического диапазона интенсивностей.

ВЫВОДЫ

1. Разработан простой и быстрый метод визуализации ультразвуковых полей, основанный на ускорении прокрашивания регистрирующих поверхностей (бумаги) красителями различного типа (метиленовый синий, малахитовый зеленый и т.д.).
2. Распределение плотности красителей на поверхности индикаторной пластинки соответствует распределению интенсивностей в сечениях ультразвуковых пучков.

3. Непосредственно из картин распределений интенсивностей, используя серую шкалу оптических плотностей, можно определять локальную интенсивность ультразвука в любой точке пространственного распределения интенсивностей в сечении ультразвукового пучка.

4. Из картины распределений интенсивностей в сечении ультразвукового пучка можно рассчитать среднее значение интенсивности ультразвука.

5. Полученные данные полностью могут быть использованы для контроля интенсивностей и их распределения в ультразвуковых пучках, генерируемых аппаратурой для ультразвуковой терапии, фонофореза, гипертермии и диагностики, а также распределений кавитационных зон в низкочастотных излучателях, применяемых для препаративных работ, ультразвуковых моек, ультразвуковых хирургических аппаратов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бергман Л. Ультразвук и его применение в науке и технике. М.: Иностранная литература, 1954. С. 131–212.
2. Розенберг Л.Д. Обзор методов визуализации ультразвуковых полей // Акустич. журнал. 1955. Т. 1, № 2, С. 99–109.
3. Хейрон М.Е. Измерение и визуализация акустических волновых полей // ТИИЭР. 1979. Т. 67, № 4. С. 10–24.

4. Применение ультразвука в медицине / Ред. К. Хилл. М.: Мир, 1989. С. 13–15, 93–121.
5. *Almkvist M., Holm A., Persson H.V., Lindstrom K.* Charakterization of air — coupled ultrasound transducers in the frequency range 40 kHz – 2 MHz using light diffraction tomography // *Ultrasonics*. 2000. V. 37, № 8. P. 565–575.
6. *Леонтьев А.П.* Измеритель мощности излучения ультразвука // *Новости мед. техники*. М., 1970. Т. 3. С. 80–87.
7. *Домаркас В.И.* Пьезоэлектрические измерительные преобразователи в биологии и медицине // *Акустич. журнал*. 1979. Т. 25, № 3. С. 470–471.
8. *Lunt M.J., Ashley B.* A simple radiation balance for a measuring ultrasonic power // *J. Med. Eng. and Technol.* 1979. Т. 3, № 4. С. 194–197.
9. *Shotton K.S.* A tethered flood radiometer for measuring the output power from ultrasonic therapy equipment // *Ultrasound in Med. & Biol.* 1980. V. 6, № 2. P. 131–133.
10. *Пашовкин Т.Н., Шильников Г.В., Сарвазян А.П.* Способ визуализации ультразвукового поля. А.с. № 1206693. БИ, № 3, 23.01.86 г.
11. *Pashovkin T.N., Sarvazyan A.P., Shilnikov G.V.* New method for visualization of ultrasonic fields // *Vortrage, Jahrestagung*. Berlin, 1985. P. 89–91.
12. *Pashovkin T.N., Sarvazyan A.P., Shilnikov G.V.* An extremely simple and rapid method for registration of ultrasonic field patterns // *Ultrasonics International 85, Conf. Proceedings*. London, UK, 2–4 July 1985. P. 324–328.
13. *Пашовкин Т.Н., Шильников Г.В., Сарвазян А.П.* Качественный и количественный анализ распределения ультразвуковой энергии плоских и фокусирующих излучателей в терапевтическом диапазоне интенсивностей // *Тез. Всес. совещ. «Новые ультразвуковые методы и приборы для применения в биологии и медицине»*. Великий Устюг, 1986. С. 60.
14. *Wattmough D.J., Shiran M.B., Quan K.M., Sarvazyan A.P., Khizhnyak E.P., Pashovkin T.N.* Evidence that Ultrasonically-induced Microbubbles Carry a Negative Electrical Charge // *Ultrasonics*. 1993. V. 30, № 5. P. 325–331.

Институт биофизики клетки РАН, Пущино.

Материал поступил в редакцию 20.04.2000.

REGISTRATION AND ANALYSIS OF INTENSITY DISTRIBUTION IN ULTRASONIC BEAMS USING DYES

T. N. Pashovkin, G. V. Shilnikov

Institute of Cell Biophysics RAS, Puchshino, Moscow Region

The visualization of local intensities and cavitation zones in ultrasonic beams generated by different ultrasonic converters is considered. Examples of ultrasonic fields visualization are given. It is shown that from the images of intensity distribution in ultrasonic beams the values of average and local intensities of ultrasound can be determined.