АКУСТИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ, 2007, том 53, № 2, с. 177–184

НЕЛИНЕЙНАЯ АКУСТИКА

УДК 534.2

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ФОРМИРОВАНИЯ НЕЛИНЕЙНЫХ АКУСТИЧЕСКИХ ВОЛН В СФОКУСИРОВАННЫХ ПУЧКАХ

© 2007 г. П. Н. Вьюгин, И. Ю. Грязнова, С. Н. Гурбатов, Д. А. Касьянов*, В. В. Курин, Л. М. Кустов

Нижегородский государственный университет
603000 Нижний Новгород, пр. Гагарина 23

E-mail: gryaznova@rf.unn.ru

**Научно-исследовательский радиофизический институт*
603000 Нижний Новгород, ул. Б. Печерская 25

E-mail: kasd@nirfi.sci-nnov.ru

Поступила в редакцию 30.03.06 г.

В работе экспериментально исследовалось образование ударных волн в сфокусированных пучках сферических гидроакустических преобразователей различной апертуры, работающих на частоте 3 МГц, а также в слабо расходящихся пучках большой интенсивности на той же частоте. Проанализированы профили принимаемых сигналов в зависимости от местоположения приемника в акустическом пучке при различных соотношениях нелинейных и дифракционных эффектов. Экспериментально показана несимметричность искажения формы исходного возмущения (области сжатия и разряжения), причем асимметрия волнового профиля в сфокусированном пучке проявлялась сильнее, чем в квазиплоской волн, а несимметричность искажения высокочастотного заполнения привела и к несимметричному искажению формы огибающей импульса. Проведено сравнение угловых характеристик волны разностной частоты параметрических излучателей звука с использованием как сфокусированных, так и слабо расходящихся пучков волн накачки. Экспериментально обнаружено, что появление пузырькового фазового экрана в области до образования ударного фронта может либо отодвинуть координату разрыва, либо привести к невозможности возникновения ударной волны вовсе. Приведены также результаты исследования изменений характеристик ударной волны в случае, когда пузырьковый фазовый экран размещен в области уже сформированной ударной волны.

PACS: 43.30.Lz, 43.25.Lj

Экспериментальные и теоретические исследования распространения интенсивных звуковых волн проводятся с середины прошлого века, и интерес к ним не ослабевает до сих пор [1, 2]. Впервые пилообразные акустические волны в жидкостях наблюдались в 1950-х годах и были объяснены влиянием квадратичной нелинейности среды [3]. Первые уникальные эксперименты по изучению пространственно-временных характеристик интенсивного ультразвука, генерируемого с помощью фокусирующих преобразователей в жидкостях, описаны в монографии [4]. Современные экспериментальные работы мирового уровня в области изучения нелинейных акустических волн проводятся на Физическом факультете МГУ под руководством проф. О.В. Руденко, о чем свидетельствуют многочисленные оригинальные и обзорные публикации в ведущих физических журналах, например, [5].

Как известно, процесс распространения мощных сфокусированных звуковых пучков определяется нелинейностью среды, диссипативными процессами, дифракционной расходимостью и фазовой сходимостью. Теоретически все эти эффекты в малоугловом приближении описываются в рамках уравнения ХЗК, численный анализ которого подробно изложен в монографии [6]. Однако современных экспериментальных работ, посвященных динамике трансформации профиля распространяющихся волн в сильно сходящихся пучках, на наш взгляд, совершенно недостаточно. Это в первую очередь связано с трудностями постановки и проведения подобных экспериментов, в частности, с регистрацией принимаемых сигналов в широкой полосе частот, перекрывающей частоты десятков гармоник исходной волны накачки.

В данной работе авторами были объединены результаты трех серий экспериментов, направленных на изучение нелинейных эффектов, возникающих при распространении интенсивных акустических пучков в воде.

Так, в первой части данной работы обсуждаются результаты лабораторных исследований пространственного изменения профиля волны накачки на оси излучения, а также поведение огибающей излученного импульса в зависимости от удаления от фокусирующего сферического гидроакустического источника.

В лабораторном эксперименте использовался пьезокерамический излучатель с апертурой 3 см и фокусным расстоянием 5 см, создающий сильно сходящийся пучок. Частота накачки импульсного квазимонохроматического сигнала составляла 3 МГц, а длительность импульсов – 40 мкс. Принимаемые акустические сигналы с миниатюрного пьезодатчика подавались непосредственно на высокоомный вход осциллографа TektroniX-TDS 3032B.

Подобная схема обеспечивала прием сигналов вплоть до частот 300 МГц, а частотная характеристика приемного тракта была ограничена лишь АЧХ самого датчика. Данные с осциллографа обрабатывались с помощью специализированной программы WaveStar, обеспечивающей, кроме того, связь с персональным компьютером.

Уникальный широкополосный приемник акустических сигналов (диапазон частот от 0 до 30 МГц), выполненный на основе пленки поливинилиденфторида (ПВДФ) и предоставленный доцентом кафедры акустики МГУ О.А. Сапожниковым, позволил провести наблюдения профиля ударной волны, содержащей до десяти неискаженных по амплитуде и фазе гармоник. К сожалению, с данным приемником удалось провести лишь предварительные эксперименты, в дальнейшем использовался миниатюрный пьезокерамический приемник с резонансной частотой 6 МГц. Поэтому приведенные результаты могут рассматриваться лишь как качественное наблюдение нелинейных искажений профиля волны в сфокусированных пучках.

Эксперименты показали, что пространственная трансформация профиля волны накачки в дифрагирующих пучках существенным образом отличается от трансформации профиля плоской волны. В частности, деформация области разряжения исходной волны происходит значительно быстрее, чем деформация области сжатия. В условиях проведенного эксперимента из-за сильной расходимости пучка за фокусом, ударная волна не образуется вовсе.

Особый интерес представляет поведение огибающей зондирующего импульса на разных расстояниях от источника, на рис. 1 приведены осциллограммы принятых сигналов на оси излучения на различных расстояниях от источника. На некоторых осциллограммах, кроме зондирующих сигналов, видны реверберационные сигналы и импульсные аппаратурные наводки. Как видно из рисунков, наблюдается перемежающаяся асимметрия формы огибающей импульсного сигнала. Первый переворот фазы происходит непосредственно за фокусом (рис. 1б). Поскольку нелинейная генерация продолжается и за фокусом, а вновь генерируемые гармоники находятся в противофазе с "рожденными" до фокуса, то наблюдается и второй переворот (рис. 1в). Третий переворот фазы, зафиксированный в экспериментах на расстоянии 11.6 см (рис. 1г, масштаб развертки изменен), пока не нашел удовлетворительного объяснения.

Вторая часть работы посвящена сравнению работы поршневых и сферических параметрических излучателей звука. Использование в гидроакустических экспериментальных исследованиях сферических излучателей для генерации волн разностной частоты (ВРЧ) позволяет расширить диаграммы направленности параметрических антенн (ПА), сохранив остальные преимущества параметрического излучения, а именно – широкополосность и практически отсутствие боковых лепестков [7].

В данной работе проведено экспериментальное изучение пространственного распределения поля ВРЧ, генерируемого сферически сходящимся пучком высокочастотных волн накачки, и сравнение его с распределением полей ВРЧ поршневого параметрического излучателя такой же апертуры.

В лабораторном эксперименте применялись широкополосные пьезокерамические излучатели с апертурой $2a$ = 3 см. При этом использовался импульсный бигармонический сигнал с частотами волн накачки f_1 = 3.0 МГц, f_2 = 3.2 МГц и длительностью импульсов 200 мкс. Длина дифракционной расходимости на высокой частоте для поршневого и фокусирующего преобразователей составляла L_D = 180 см, а фокусное расстояние сферического источника равнялось F = 5 см. Использование источника такой конструкции позволило исследовать генерацию ВРЧ в сильно сходящихся пучках. Прием слабых акустических НЧ сигналов производился высокочувствительным

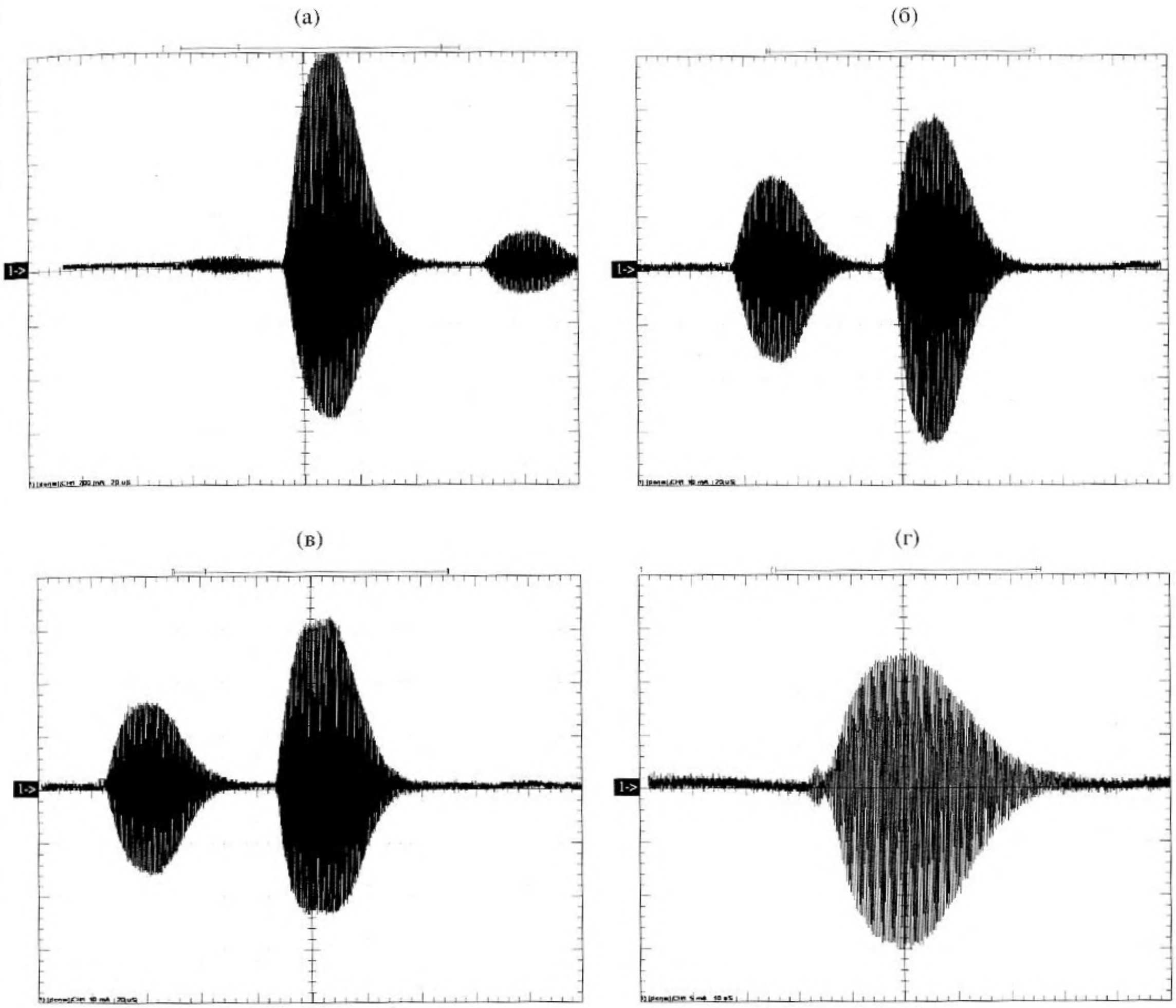

Рис. 1. Осциллограммы принятых сигналов на оси излучения (по оси ординат – амплитуда в мВ, по оси абсцисс – время в мкс) на расстояниях:
а. 5 см (в фокусе),
б. 8.2 см,
в. 8.9 см,
г. 11.6 см.

супергетеродинным приемником AR5000. Сбор экспериментальных данных осуществлялся в цифровом виде с помощью 12-ти разрядного АЦП AT-MIO-16E-2 (NI 6060E for ISA) производства корпорации National Instruments, частота квантования составляла 500 кГц. Обработка и визуализация результатов проводилась с применением специализированной программы обработки экспериментальных данных Origin 6.0 фирмы OriginLab Corporation (USA).

Анализ экспериментальных результатов показал, что на генерацию ВРЧ в сферических сходящихся пучках оказывают влияние несколько факторов, препятствующих увеличению эффективности нелинейного преобразования НЧ волн. Увеличение интенсивности волн накачки в области фокусного пятна компенсируется усилением дифракционной расходимости за счет уменьшения радиуса пучка в фокальной плоскости.

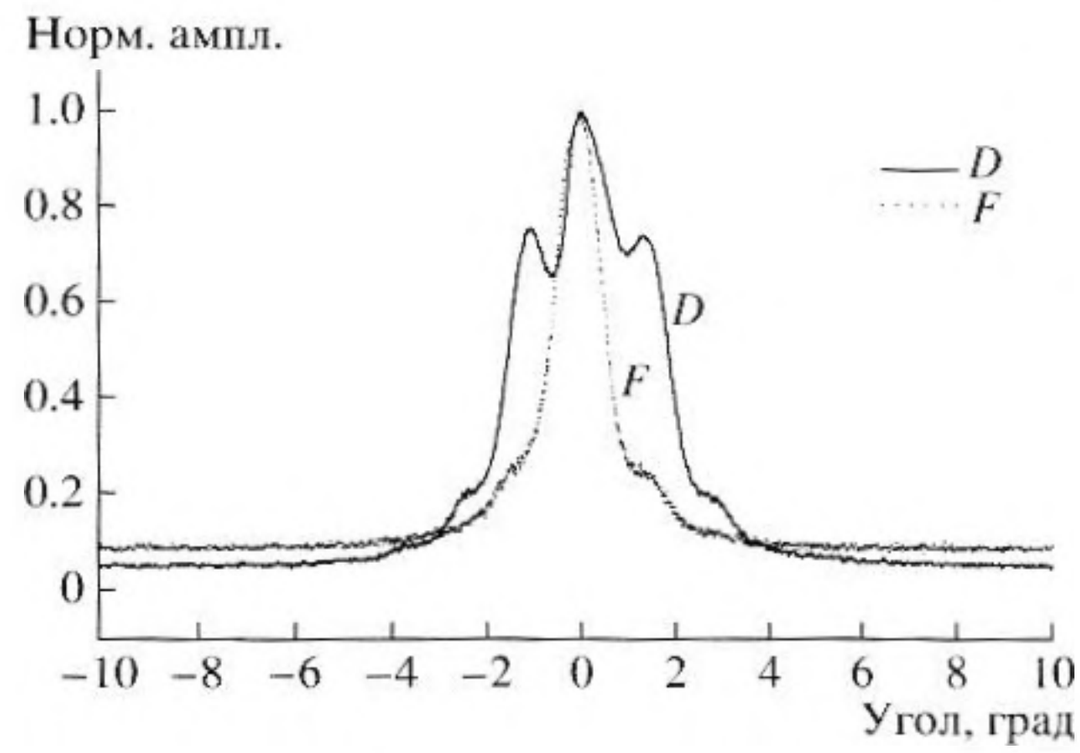

Рис. 2. Угловое распределение амплитуды поля ВРЧ поршневого параметрического излучателя на расстояниях 60 (*D*) и 120 (*F*) см от источника.

Для примера на рис. 2 представлено нормированное угловое распределение амплитуды поля ВРЧ поршневого параметрического излучателя. Как видно из рисунка, происходит обужение углового распределения поля ВРЧ по мере удаления от излучателя ввиду увеличения области взаимодействия волн накачки. Поскольку режим работы преобразователя близок к режиму Вестервельта, а длина затухания значительно превышает длину исследуемых трасс, то в качестве параметра, определяющего ширину углового распределения, выступает не длина затухания [8], а расстояние между источником и приемником.

На рис. 3а представлено поперечное распределение поля ВРЧ сферического параметрического источника в фокальной плоскости, а на рис. 3б – его осевое распределение. Как видно из рисунка, в поперечном распределении наблюдается асимметрия в амплитуде боковых лепестков, что связано с конструктивными особенностями используемого сферического источника.

Следует отметить, что уменьшение интегральной области взаимодействия ВЧ волн, происходящее за счет сильной сферической расходимости волн накачки за фокусом, приводит к уменьшению эффективности генерации ВРЧ. С другой стороны, скачок фазы на π ВРЧ при прохождении фокуса также приводит к резкому снижению эффективности преобразования ПА. Причиной этого является тот же механизм, что и при отражении ВРЧ от свободной поверхности жидкости [7]. Все вышеперечисленные факторы приводят к тому, что пространственная область, в которой регистрируется НЧ поле, локализована вблизи фокусного пятна с характерным продольным размером порядка 8 см, а поперечным – всего 6 мм. Подобные параметрические сферические антенны могут быть использованы для низкочастотной медико-биологической диагностики.

Очевидно, что для эффективного взаимодействия гармоник в нелинейной среде необходим их фазовый синхронизм. Если по каким-либо причинам этот синхронизм будет нарушен, например, путем создания пузырьковой завесы на пути распространения волны, то это приведет к замедлению или прекращению нелинейного искажения профиля волны по мере ее распространения.

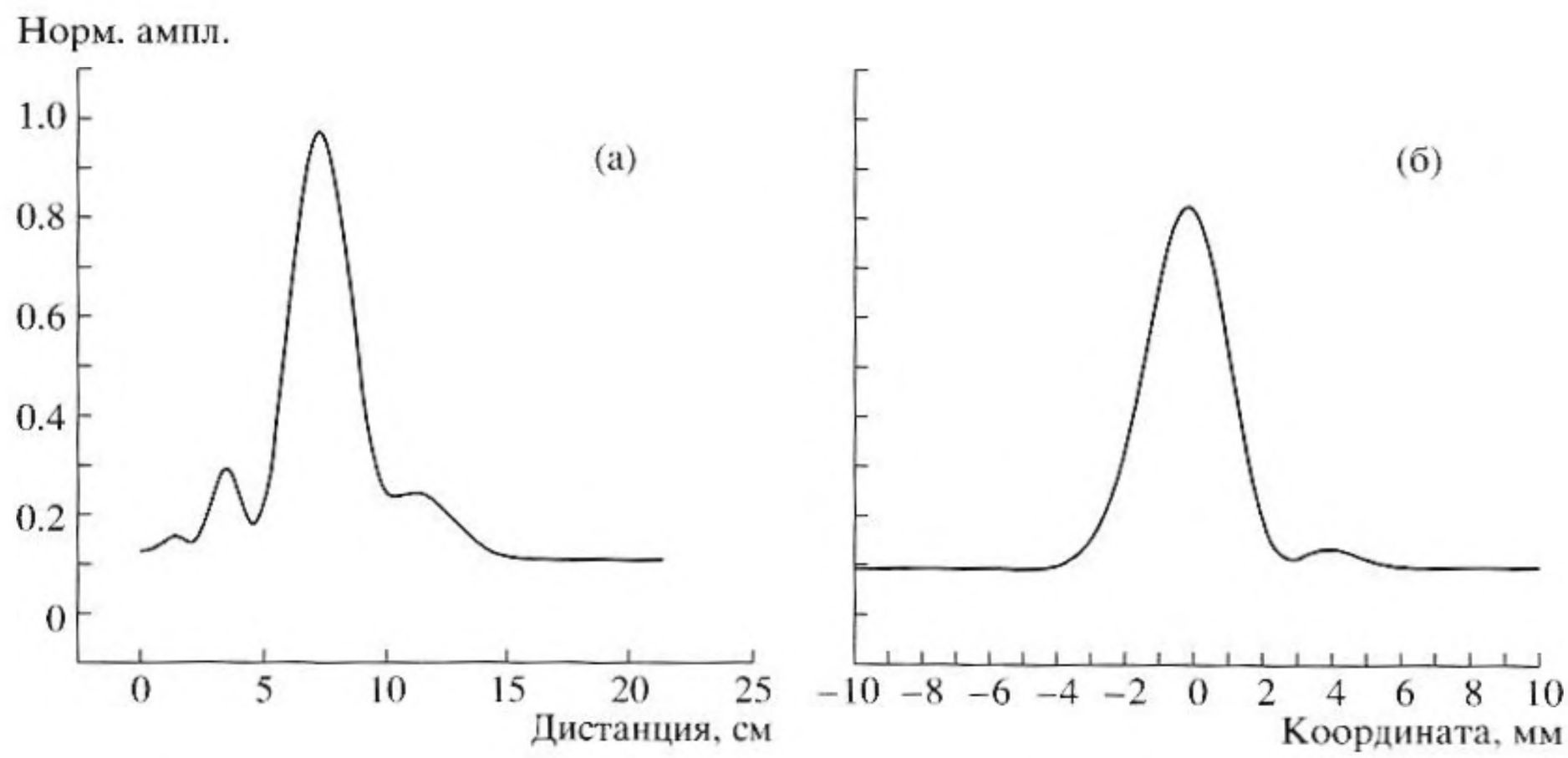

Рис. 3. Распределение амплитуды поля ВРЧ сферического параметрического излучателя:
а. осевое,
б. поперечное.

В третьей части данной работы было проведено экспериментальное исследование влияния всплывающего тонкого хаотического пузырькового слоя на образование ударных волн, как в сферических, так и в плоских пучках большой интенсивности. Поскольку резонансные частоты основной массы пузырьков были много меньше частоты накачки, пузырьковый слой слабо изменял интенсивность взаимодействующих гармоник и, влияя в основном на фазу взаимодействующих волн, являлся фазовым экраном.

Кратко опишем работу блоков, входящих в экспериментальную установку. Квазимонохроматический импульсный сигнал, формирующийся модулятором, через усилитель мощности поступал на пьезокерамический излучатель. Длительность импульсов и частота их повторения задавались генератором импульсов, а частота заполнения – генератором стандартных сигналов. В качестве излучателя использовался либо фокусирующий источник акустических волн с апертурой 3 см и фокусным расстоянием 4.6 см, создающий сильно сходящийся пучок, либо поршневой излучатель, создающий слабо расходящийся пучок (длина дифракционной расходимости на частоте накачки 3 МГц составляла 80 см). Делитель частоты обеспечивал привязку фазы заполнения излученного радиоимпульса от посылки к посылке и синхронизацию работы всей установки в целом. Длительность импульсов в экспериментах с использованием сферического излучателя составляла 40 мкс, а с поршневым излучателем – 30 мкс. Интенсивность акустических волн вблизи источников была порядка 5 Вт/см^2. В экспериментальном бассейне размером $60 \times 60 \times 460$ см на трехкоординатных устройствах размещалась приемно-излучающая система. В ходе экспериментов расстояние R между источником и приемником изменялось, точность позиционирования при этом составляла ± 1 мм. На трассе распространения излученного акустического пучка большой интенсивности располагался фазовый экран, формирующийся тонким слоем всплывающих пузырьков, который создавался с помощью электролиза. Количество генерируемых пузырьков изменялось в широких пределах: от одиночных (слабый фазовый экран) до сплошной пелены.

В ходе экспериментов исследовался профиль нелинейной волны в зависимости от интенсивности возмущения, вносимого фазовым экраном, а также от того, в каком месте трассы распространения этот экран располагался. Принимаемые акустические сигналы с миниатюрного пьезодатчика, находившегося за пузырьковым слоем, подавались непосредственно на высокоомный вход осциллографа Tektronix-TDS 3032B. При подготовке данного эксперимента особое внимание было уделено контролю за линейностью излучающего тракта установки.

Одна серия экспериментов была посвящена исследованию нелинейного искажения профиля волны, сформированной сферическим источником, в чистой воде, не содержащей газовых пузырьков. Результаты измерений на разных расстояниях от источника представлены на рис. 4. Визуализация и передача данных в персональный компьютер осуществлялась с помощью программы сопряжения осциллографа Tektronix с PC OpenChoice. Как видно из приведенных осциллограмм, нелинейные искажения волны проявляются на оси излучателя еще до фокуса на расстоянии 4.3 см (рис. 4а).

Как известно, нелинейные искажения в интенсивных акустических пучках с учетом дифракции происходят несимметричным образом – фаза разряжения растягивается, а фаза сжатия увеличивается по амплитуде и сжимается. Такая асимметричная форма волны типична для мощных пучков, излучаемых пьезоэлектрическими излучателями мегагерцового диапазона в задачах медицинской диагностики и терапии [5]. Это явление, связанное с дифракционным сбоем фазы между гармониками и особенно сильно проявляющееся в области фокусного пятна, давно известно, подтверждено численным анализом на основе уравнения ХЗК [6] и нашло подтверждение в наших экспериментах.

При прохождении через фокус сходящаяся волна становится расходящейся, что соответствует изменению фазы всех гармоник, формирующих сигнал на этом расстоянии, на π, что иллюстрирует рис. 4б.

Несмотря на то, что, начиная с этих расстояний, пучок становится расходящимся, интенсивность поля на оси достаточна для эффективной нелинейной генерации высших гармоник. В результате гармоники, рождаемые после фокуса, находятся в противофазе к инвертированным гармоникам, сформированным до фокуса. По мере удаления точки приема от фокусного пятна происходит взаимное уничтожение высших гармоник, приводящее к существованию в сильном нелинейном поле пространственной области, где наблюдается синусоидальный сигнал (рис. 4в).

Если амплитуда поля достаточна для того, чтобы нелинейная генерация продолжалась, то по мере удаления приемника нелинейные эффекты будут накапливаться (рис. 4г), что может вновь привести к образованию ударной волны.

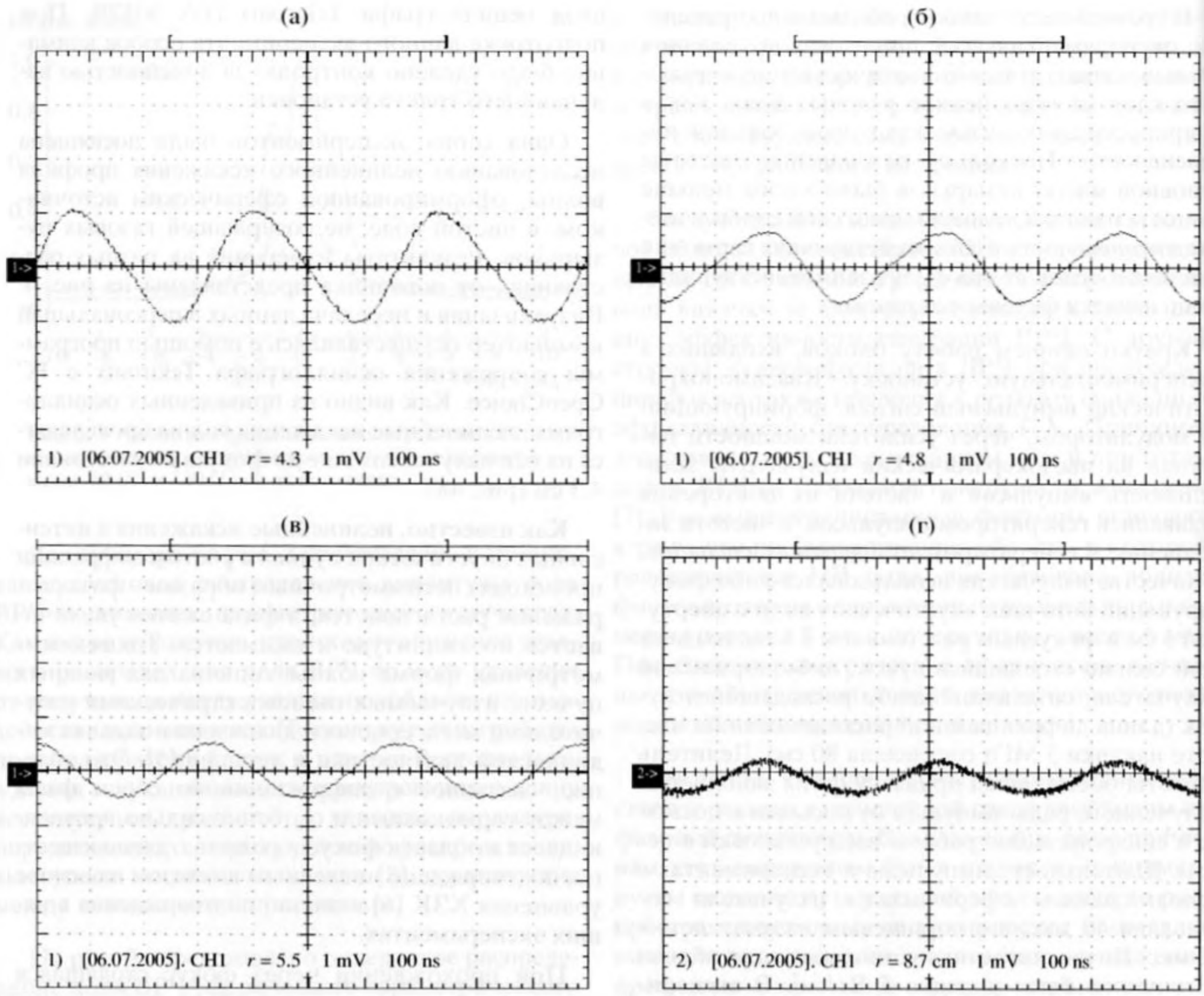

Рис. 4. Профиль волны при отсутствии пузырькового экрана на расстояниях от фокусирующего источника:
а. 4.3 см,
б. 4.8 см,
в. 5.5 см,
г. 8.7 см.

Результаты следующей серии экспериментов иллюстрируют деструктивное влияние фазового экрана на процесс образования ударной волны (рис. 5, 6). Пузырьковый слой находился на расстоянии 2 см от апертуры сферического источника (рис. 5г), для сравнения на рис. 5а зафиксирован вид волны в отсутствие фазового экрана.

На рис. 6а представлен невозмущенный профиль ударной волны, зарегистрированный на оси пучка излучения поршневого источника. Отличие этого профиля от "классического" связано с тем, что в экспериментах использовался приемный щуп с резонансной частотой 6 МГц, обеспечивающей эффективный прием лишь двух первых гармоник исходного сигнала, причем амплитуда второй была непропорционально завышена, и не был скомпенсирован аппаратный фазовый сдвиг между гармониками.

Как показали эксперименты, возмущения профиля нелинейной волны, вносимые фазовым экраном, существенным образом зависят от того, в каком месте он расположен. Так, если пузырьковый слой находится вблизи координаты разрыва, когда профиль ударной волны практически сформирован, то вносимые им искажения в профиль ударной волны являются минимальными (рис. 6б). Однако при нахождении пузырькового слоя вблизи источника звука, на дистанциях фор-

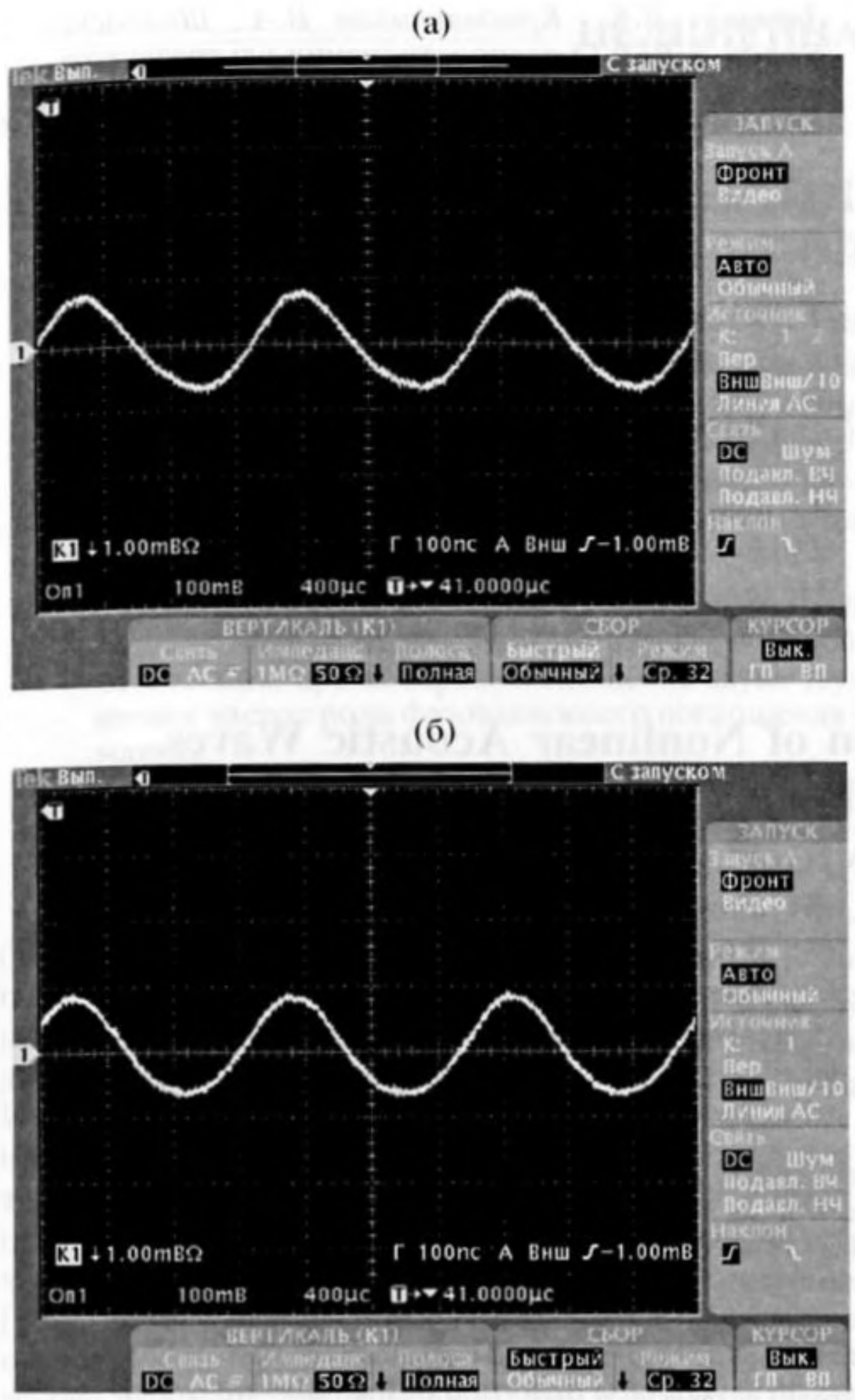

Рис. 5. Профиль волны на расстоянии 4 см от сферического источника:

а. в отсутствие пузырьков,

б. при наличии пузырьковой завесы вблизи источника.

мирования ударной волны, в области за слоем она может не образоваться вовсе (рис. 6в), либо дистанция образования разрыва увеличится, поскольку случайные фазовые сбои приводят к некогерентному сложению гармоник, и вследствие этого, к их неэффективному нелинейному взаимодействию.

Таким образом, в работе отражены результаты комплексного экспериментального исследования нелинейного искажения акустических волн, сформированных как сферическими, так и поршневыми источниками звука в воде, в том числе при наличии пузырькового фазового экрана на трассе распространения волны, проведено сравнение работы поршневых и сферических параметрических излучателей звука.

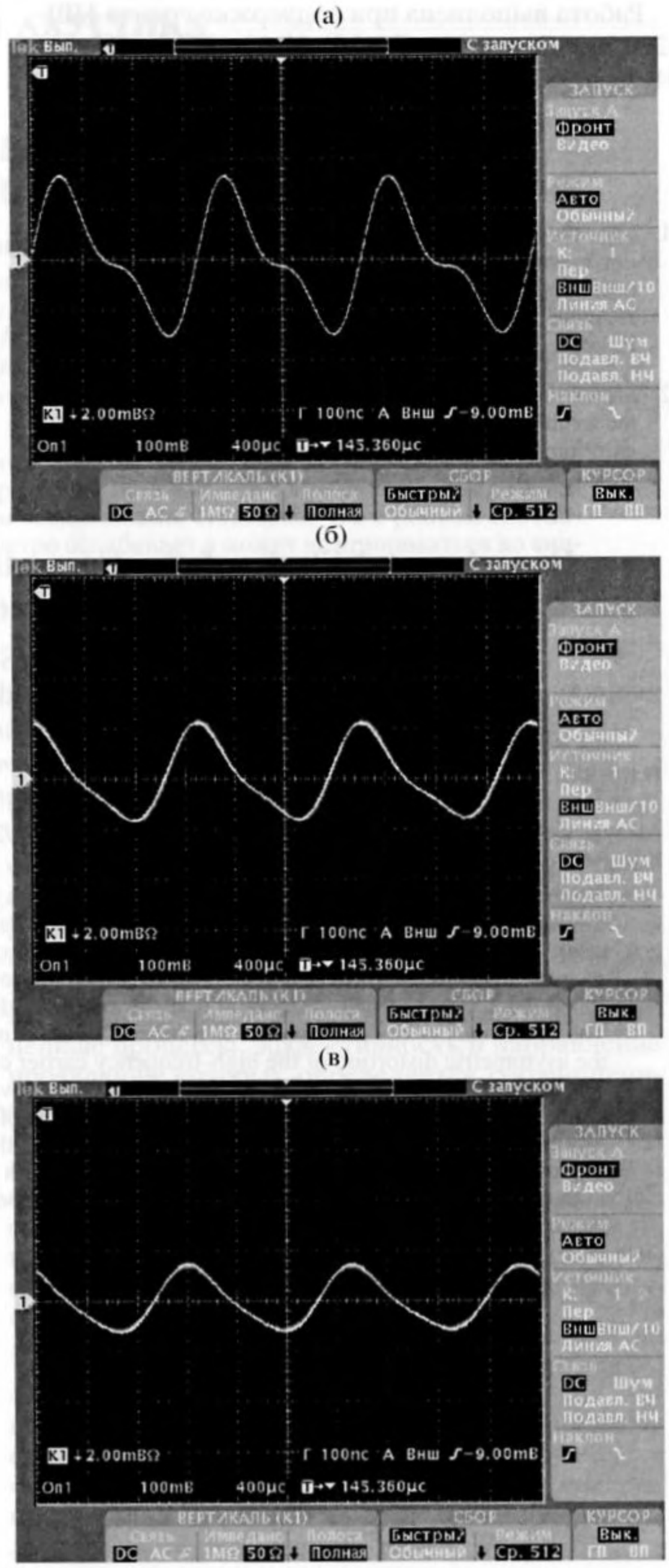

Рис. 6. Профиль волны на расстоянии 19.5 см от поршневого излучателя:

а. в отсутствие пузырьков,

б. при наличии пузырьковой завесы на расстоянии 8.7 см от источника,

в. при нахождении пузырькового слоя на расстоянии 1.5 см от источника.

Работа выполнена при поддержке гранта НШ-5200.2006.2, грантов РФФИ 05-02-16517 и РФФИ 04-02-16562.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Sapozhnikov O.A., Khokhlova V.A., Cathignol D.J.* Nonlinear waveform distortion and shock formation in the near field of a continuous wave piston source // J. Acoust. Soc. Amer. 2004. Vol. 115. № 5. Pt 1. P. 1982.
2. *Menounou P., Blackstock D.* A new method to predict the evolution of the power spectral density for a finite-amplitude sound wave // J. Acoust. Soc. Amer. 2004. Vol. 115. № 2. P. 567.
3. *Зарембо Л.К., Красильников В.А., Шкловская-Корди В.В.* // О распространении ультразвуковых волн конечной амплитуды в жидкостях // Акуст. журн. 1957. Т. 3. № 1. С. 29.
4. *Зарембо Л.К., Красильников В.А.* Введение в нелинейную акустику. М.: Наука, 1966. 519 с.
5. *Руденко О.В., Сапожников О.А.* Явления самовоздействия пучков волн, содержащих ударные фронты // УФН. 2004. Т. 174. № 9. С. 973.
6. *Бахвалов Н.С., Жилейкин Я.М., Заболотская Е.А.* Нелинейная теория звуковых пучков. М.: Наука, 1982. 176 с.
7. *Новиков Б.К., Тимошенко В.И.* Параметрические антенны в гидролокации. Л.: Судостроение, 1989. 256 с.
8. Нелинейная акустика / Под ред. В.А. Зверева и Л.А. Островского. Горький, ИПФ АН, 1980. 224 с.

Experimental Study of the Formation of Nonlinear Acoustic Waves in Focused Beams

P. N. V'yugin, I. Yu. Gryaznova, S. N. Gurbatov, D. A. Kas'yanov, V. V. Kurin, and L. M. Kustov

Nizhni Novgorod State University, pr. Gagarina 23, Nizhni Novgorod, 603000 Russia
e-mail: gryaznova@rf.unn.ru
Radiophysical Research Institute, ul. B. Pecherskaya 25, Nizhni Novgorod, 603000 Russia
e-mail: kasd@nirfi.sci-nno9v.ru

Abstract—The shock wave formation in focused beams produced by spherical hydroacoustic transducers with different apertures and an operating frequency of 3 MHz, as well as in weakly divergent high-intensity beams of the same frequency, is studied experimentally. The profiles of the received signals are analyzed for different receiving points in the acoustic beam and for different combinations of nonlinear and diffraction effects. It is found that the distortion of the initial waveform (i.e., of the compression and rarefaction phases) is asymmetric. The asymmetry of the wave profile in a focused beam is more pronounced than that in a quasi-plane wave while the asymmetric distortion of the high-frequency carrier causes an asymmetric distortion of the pulse envelope. The angular characteristics of the difference-frequency waves produced by parametric sound radiators are compared using both focused and weakly divergent beams of pump waves. The experiments also show that the appearance of a bubbly phase screen in the region before the point of the shock formation either shifts this point to greater distances or makes the discontinuity formation impossible. Results illustrating the changes that occur in the shock wave characteristics when the bubbly phase screen is placed in the region of the fully developed shock are presented.