АКУСТИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ, 2003, том 49, № 1, с. 24–29

УДК 534.222.2

ПАРАМЕТРИЧЕСКОЕ ОБРАЩЕНИЕ ФРОНТА ВТОРОЙ ГАРМОНИКИ НЕЛИНЕЙНОГО УЛЬТРАЗВУКОВОГО ПУЧКА

© 2003 г. А. П. Брысев, Ф. В. Бункин, М. Ф. Гамильтон*, Р. В. Клопотов, Л. М. Крутянский, К. Ян*

Научный центр волновых исследований Института общей физики РАН, 119991 Москва, ул. Вавилова 38, тел./fax: 7 095 952 12 24

E-mail: brysev@orc.ru

**Инженерно-механический факультет, Университет штата Техас в Остине, Остин, Техас, 78712-1063, США*

E-mail: hamilton@mail.utexas.edu

Поступила в редакцию 18.03.2002 г.

Эффект обращения волнового фронта (ОВФ) второй гармоники сфокусированного ультразвукового пучка исследован экспериментально и с помощью численного моделирования. Ультразвуковой импульс с несущей частотой $f = 3$ МГц излучался в воду и фокусировался в точке между источником и обращающей системой. ОВФ второй гармоники падающей волны ($2f = 6$ МГц) осуществлялось в магнитострикционной керамике при параметрическом взаимодействии падающей волны и магнитного поля накачки (частота $f_p = 4f = 12$ МГц). Аксиальное и фокальное распределение звукового давления в падающем и обращенном пучках было измерено с помощью широкополосного мембранного PVDF-гидрофона. Соответствующие расчеты выполнялись с помощью численного решения уравнения Хохлова–Заболотской–Кузнецова (ХЗК), которое учитывает нелинейность, дифракцию и термовязкое поглощение. Результаты измерений удовлетворительно согласуются с расчетами и демонстрируют, что поле обращенной волны достаточно хорошо воспроизводит поле второй гармоники падающей волны. Продемонстрировано некоторое преимущество ОВФ-фокусировки при обращении второй гармоники по сравнению с работой на удвоенной частоте падающей волны. Полученные результаты могут служить физической основой для использования ОВФ гармоник в акустоскопии и неразрушающем контроле.

Проблема обращения волнового фронта в акустике привлекает внимание ученых уже в течение длительного времени. Не обошел ее вниманием и Л.М. Лямшев, памяти которого посвящается этот выпуск журнала. Он сам занимался этой тематикой [1] и с большим интересом относился к исследованиям, проводимым в этой области другими коллективами, в том числе и нашей группой.

Традиционно при обращении волнового фронта (ОВФ) в акустике источниками излучения, волновой фронт которых необходимо обратить, являются пассивные рассеиватели или обычные ультразвуковые излучатели [2]. В этом случае обращенная волна, воспроизводя в обратной временной последовательности все стадии распространения падающей, возвращается на локализованный источник. На этом свойстве ОВФ основан способ самонаведения ультразвуковой энергии на рассеивающие объекты в жидкости [3, 4] и метод компенсации фазовых искажений для получения акустических изображений объектов в фазово-неоднородной среде [5, 6].

Вместе с тем, возможна и другая физическая ситуация, когда источник обращаемой волны, не имея четкой локализации, является распределенным. Примером могут служить гармоники, возникающие при распространении интенсивных звуковых волн в нелинейной среде. Что будет представлять собой волна, полученная в результате ОВФ одной из гармоник падающей волны, a priori не вполне ясно. Исследование таких волн представляется необходимым и интересным также и с точки зрения применения ОВФ для компенсации фазовых искажений в нелинейных методах построения акустических изображений [7]. Как правило, эти методы используют вторую гармонику зондирующего излучения, которая, по сравнению с первой, лучше сфокусирована, имеет меньший уровень побочных максимумов и менее подвержена эффекту реверберации.

Определенное качественное представление об ожидаемых результатах ОВФ гармоник можно получить на основе уравнения Хохлова–Заболотской–Кузнецова (ХЗК), используя его аналитическое решение для случая осесимметричного источника с гауссовым распределением амплитуды. Вторая гармоника, генерируемая в падающей волне, может быть записана как $p_{2\text{in}}(r, z, t) = q_{2\text{in}}(r, z)e^{i2(\omega t - kz)}$, где r и z – соответственно поперечная и продольная цилиндрические координа-

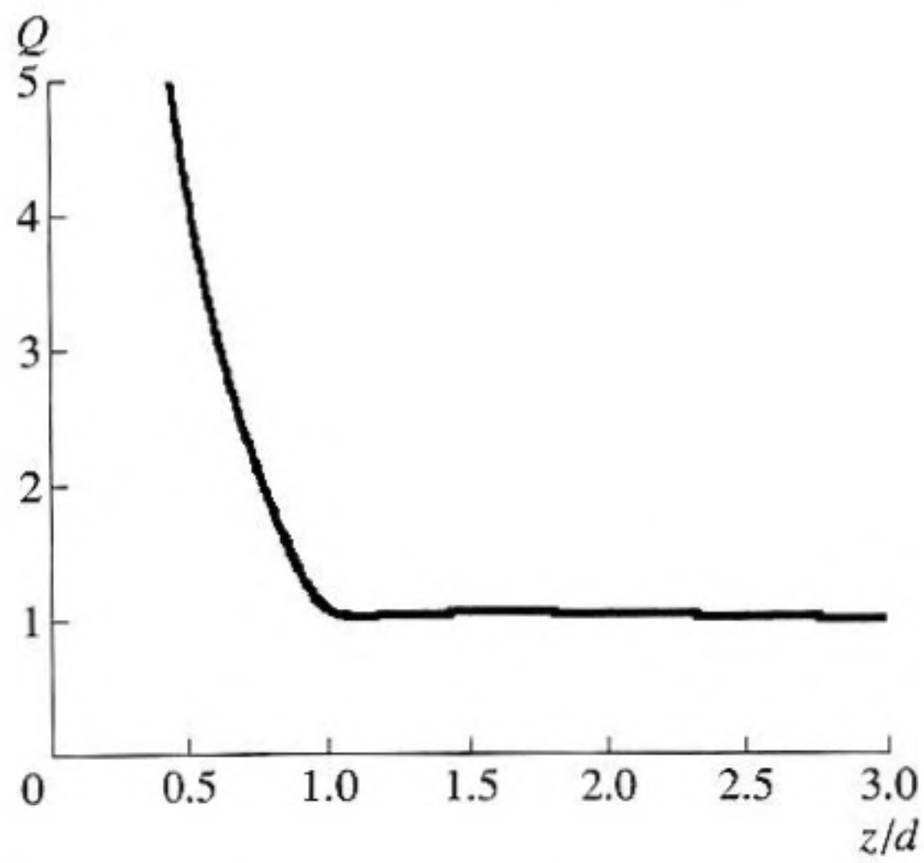

Рис. 1. Осевое распределение отношения амплитуд обращенной волны и второй гармоники падающей волны ($Q = |q_{2c}/q_{2i}^*|$) в сфокусированном гауссовом пучке.

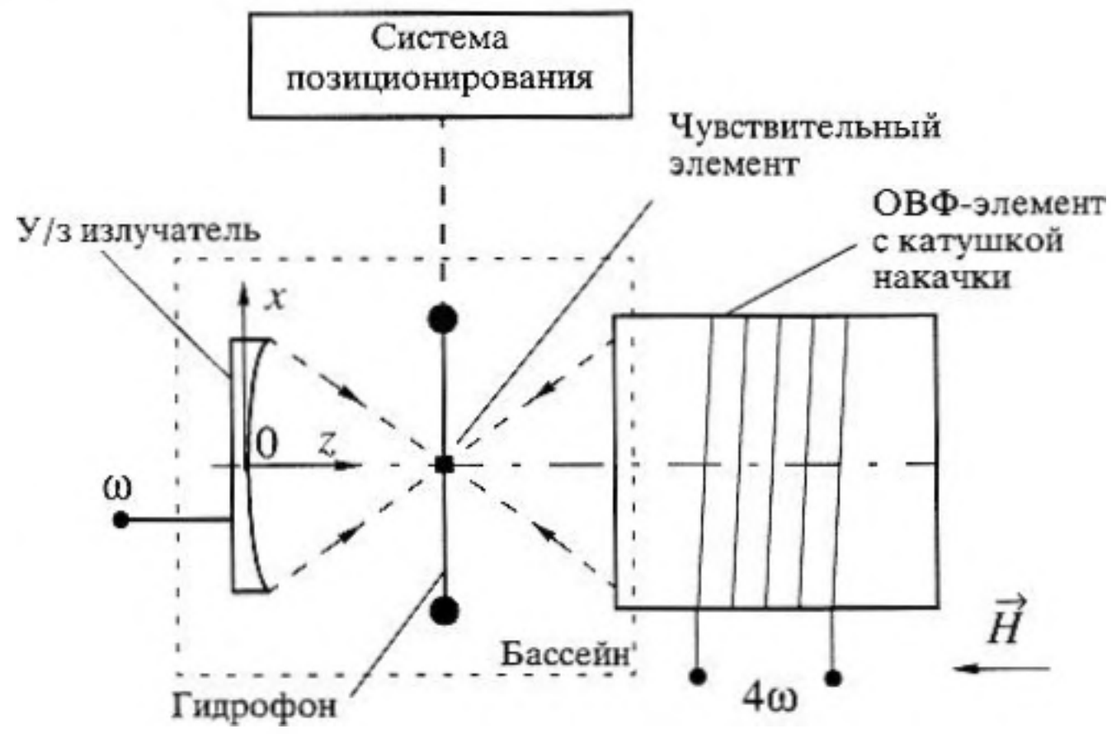

Рис. 2. Схема эксперимента. H – постоянное магнитное поле подмагничивания. x, z – координатные оси. Штриховыми стрелками условно показано распространение звуковых пучков.

ты, $k = \omega/c$, $\omega = 2\pi f$ – круговая частота, c – скорость звука, а выражение для $q_{2\text{in}}$ известно (см. например, [8]). Тогда обращенная волна будет иметь вид $p_{2c}(r, z, t) = q_{2c}(r, z)e^{i2(\omega t + kz)}$. Считая для простоты усиление при ОВФ-преобразовании единичным, распространение обращенной волны линейным и пренебрегая поглощением, можно получить следующее соотношение для случая сфокусированного падающего пучка:

$$\frac{q_{2c}}{q_{2i}^*} = \frac{\ln[1-(1+1/iG)h/d]}{\ln[1-(1+1/iG)z/d]}. \qquad (1)$$

Здесь звездочка обозначает комплексное сопряжение, $G = ka^2/2d$ – коэффициент фокусировки, a – радиус источника, d – фокусное расстояние, h – расстояние от излучателя до плоскости ОВФ-преобразования. Примечательно, что поперечные распределения падающего и обращенного пучков совпадают, а различия проявляются только вдоль направления распространения. На рис. 1 показана зависимость $Q = |q_{2c}/q_{2i}^*|$ от безразмерной продольной координаты z/d для случая $G = 10$ и $h/d = 3$. Между фокусом и ОВФ-системой, где генерация второй гармоники в падающем пучке невелика, амплитуды обеих волн практически одинаковы ($Q \approx 1$). В направлении от фокуса к излучателю Q монотонно нарастает, поскольку амплитуда генерируемой в падающем пучке второй гармоники стремится к нулю при приближении к источнику, в то время как обращенная волна распространяется линейно вдоль z.

Предметом настоящей работы является экспериментальная реализация и исследование параметрического ОВФ второй гармоники сфокусированного ультразвукового пучка, излученного реальным источником. Обращение отдельных гармонических компонент падающего звукового излучения достаточно просто осуществить в рамках параметрического метода ОВФ [9]. Необходимые условия обеспечиваются благодаря резонансной природе взаимодействия звуковых волн и параметрической электромагнитной накачки в активной обращающей среде. Для селекции требуемой гармоники достаточно установить обычное для параметрического метода соотношение частот накачки f_p и выбранной частотной компоненты f обращаемой волны: $f_p = 2f$. В работе измерено и численно смоделировано аксиальное и фокальное распределение звукового давления как в падающем, так и в обращенном пучке. Обнаружено согласие расчетных и экспериментальных данных и продемонстрировано восстановление в обращенной волне поля второй гармоники падающей волны. Показано, что при ОВФ второй гармоники сфокусированного пучка можно несколько снизить уровень побочных максимумов ОВФ-фокусировки по сравнению со случаем использования падающей волны удвоенной частоты.

Упрощенная схема эксперимента показана на рис. 2. Фокусирующий преобразователь "Panametrics M307" диаметром 27 мм и фокусным расстоянием 84 мм[1] излучал в воду, налитую в бассейн, ультразвуковой импульс длительностью 30 мкс и несущей частотой $f = 3$ МГц. Возбуждаемая излучателем волна была достаточно интенсивной, и при ее распространении происходила генерация высших гармоник ($2f$, $3f$ и т.д.). Для минимизации

[1] Под фокусным мы здесь понимаем т.н. "геометро-оптическое" фокусное расстояние. Реальная точка максимума амплитуды давления смещена к излучателю тем больше, чем ниже частота излучения.

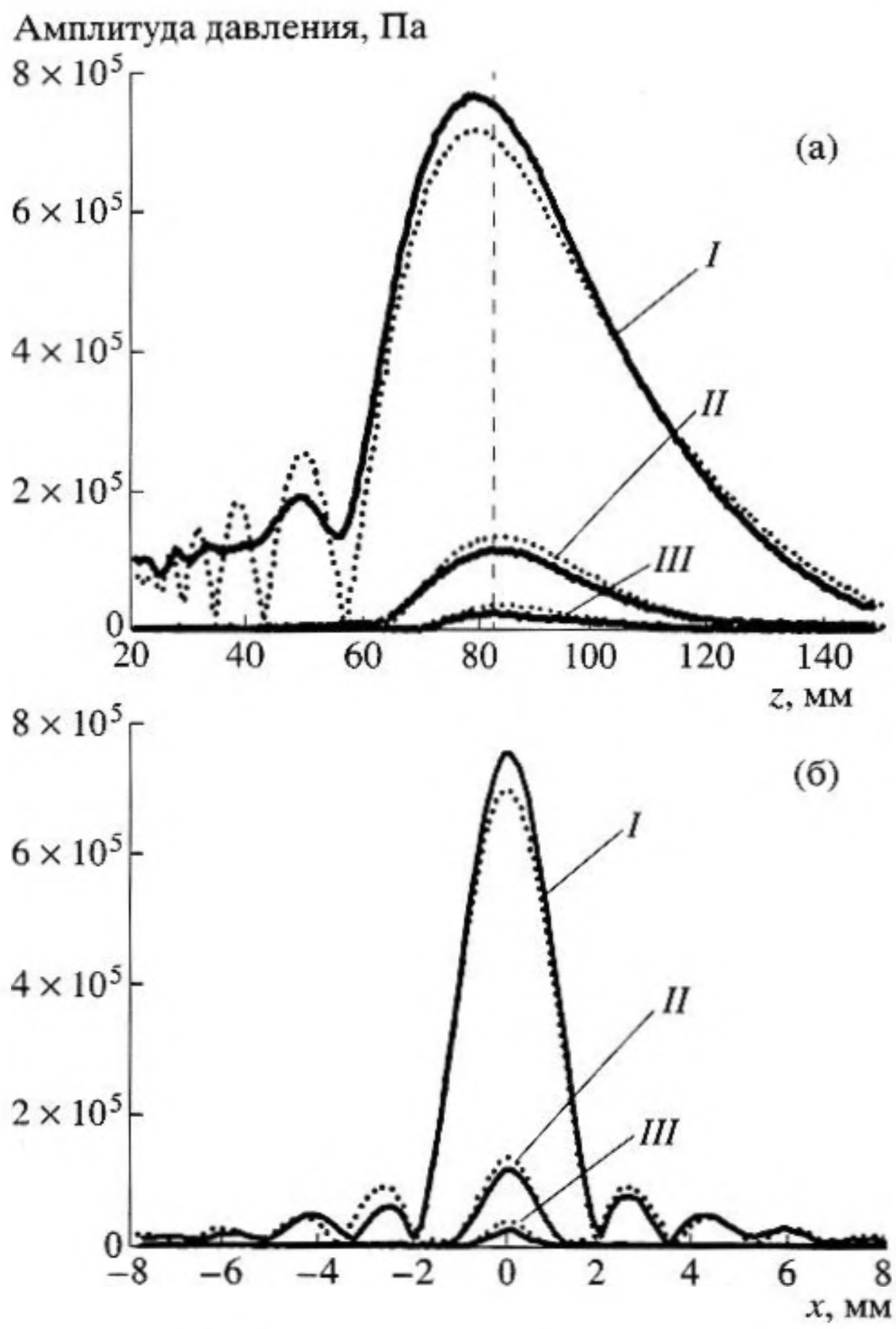

Рис. 3. Распределение амплитуд давления первых трех гармоник в падающем пучке. а – вдоль оси, б – поперек пучка в фокусе *II* гармоники. z – расстояние от излучателя, x – расстояние от оси пучка. Сплошные линии – эксперимент, пунктирные линии – расчет. *I* – *III* – номера гармоник с частотами соответственно $f = 3$ МГц, $2f = 6$ МГц и $3f = 9$ МГц. Штриховой линией условно показано положение плоскости поперечного сканирования.

паразитного излучения преобразователем второй гармоники в схеме возбуждения был использован специальный фильтр. Уровень второй гармоники на расстояниях 20–25 мм от излучателя не превышал –35 дБ от уровня первой, что хорошо согласуется с расчетами для случая чисто монохроматического излучения. Соосно с излучателем на расстоянии 206 мм от него[2] через отверстие в стенке бассейна был установлен ОВФ-элемент, изготовленный из специальной магнитострикционной керамики и имевший форму цилиндра диаметром 36 мм и длиной 150 мм. Конструкция и принцип действия использованной ОВФ-системы описывались ранее (например, в [2, 3]). Для расширения углового рабочего диапазона системы и улучшения качества ОВФ-преобразования на рабочей поверхности активного элемента была нанесена система концентрических канавок (см. [10, 11]). ОВФ второй гармоники падающей волны обеспечивалось с помощью параметрической накачки. Она представляла собой импульс переменного магнитного поля длительностью 50 мкс и несущей частотой $2 \times 2f = 12$ МГц, создававшегося с помощью специальной обмотки вдоль оси ОВФ-элемента в тот момент, когда в нем оказывался импульс падающей волны. При этом амплитуда создаваемой обращенной волны (с частотой $2f = 6$ МГц) была, свою очередь, достаточной для интенсивной генерации гармоник ($4f$, $6f$, $8f$, ...) при распространении, что представляет несомненный интерес для ряда практических приложений. Акустические поля падающего и обращенного пучков измерялись широкополосным мембранным PVDF-гидрофоном, перемещаемым как вдоль оси пучка, так и поперек нее. Диаметр чувствительного элемента гидрофона составлял 0.5 мм. При измерениях вдоль оси с помощью соответствующей задержки интервала анализа отслеживалась одна и та же часть волнового пакета в процессе его распространения. Сигнал с гидрофона после усиления регистрировался цифровым осциллографом "Tektronix" TDS 340A, где производилось также усреднение по 32 выборкам и быстрое Фурье-преобразование, затем массивы экспериментальных данных поступали в компьютер.

Моделирование проводилось на основе численного решения во временной области уравнения ХЗК [12]. В предположении поршневого излучения рассчитывалось нелинейное распространение падающей волны до ОВФ-элемента. В плоскости его рабочей грани с помощью преобразования Фурье выделялась вторая гармоника частотного спектра ($2f$), и вне апертуры системы значения Фурье-компонент полагались равными нулю. Комплексно сопряженное поле второй гармоники преобразовывалось обратно во временную область, при этом учитывалось полученное в экспериментах значение усиления системы. Затем рассчитывалось нелинейное распространение обращенной и усиленной волны назад к излучателю.

Результаты измерений и соответствующих расчетов показаны на рис. 3–6. На рис. 3 представлены осевые (а) и поперечные (б) распределения давления в падающем пучке. Поперечное сканирование проводилось в точке $z = 82$ мм, где находился максимум интересующей нас второй гармоники. Измерения довольно хорошо согласуются с расчетом, а сами зависимости типичны для сфокусированного пучка конечной амплитуды. Наблюдается генерация высших гармоник, их амплитуды нарастают с расстоянием и достигают максимума вблизи фокуса. В фокальной области

[2] Расстояние выбиралось с таким расчетом, чтобы падающий пучок в геометрическом приближении целиком попадал в апертуру обращающего элемента.

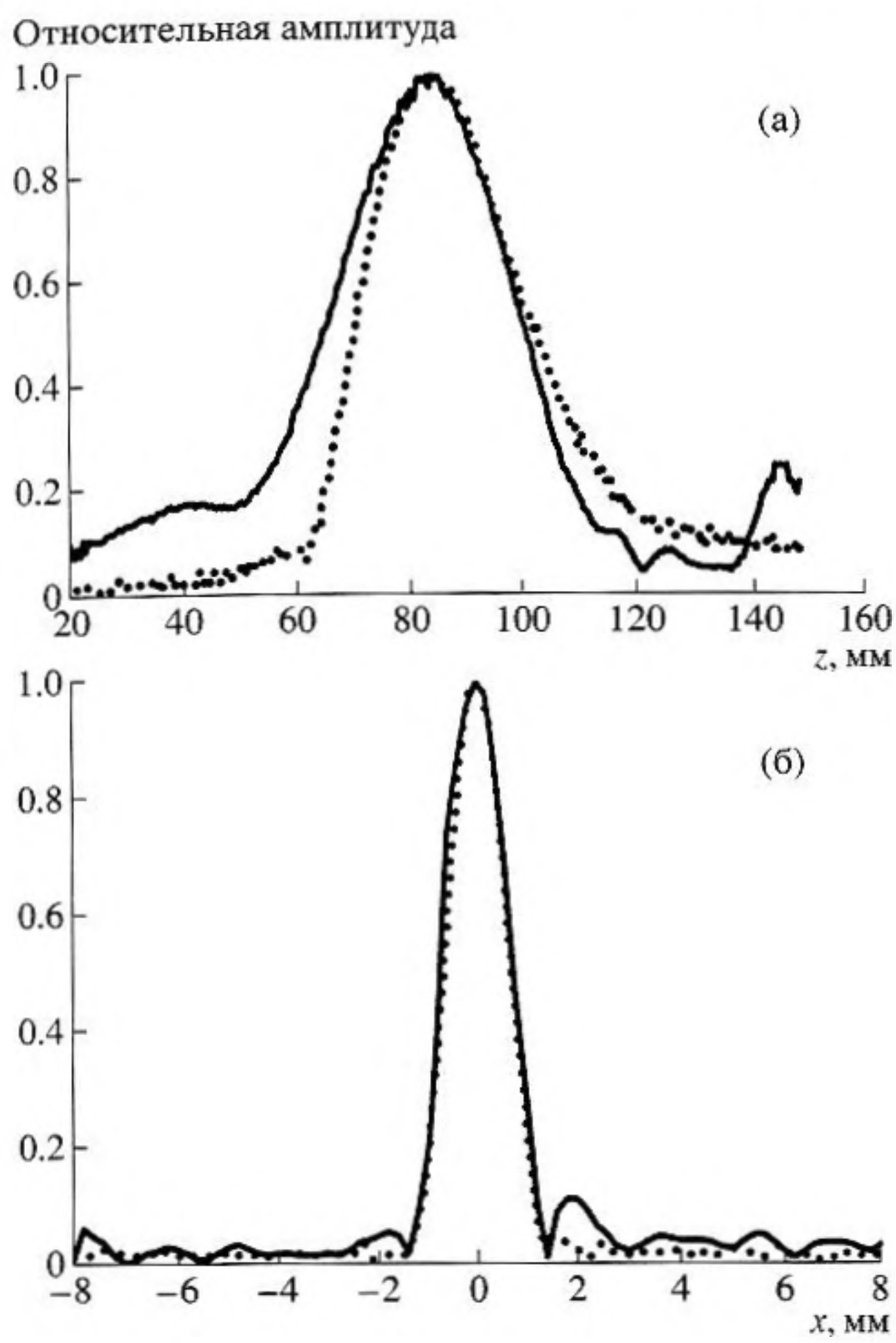

Рис. 4. Сравнение полей основной гармоники обращенной волны и второй гармоники падающей волны. а – вдоль оси пучка, б – поперек оси в точке $z = 82$ мм. Сплошная линия – обращенная волна, пунктир – II гармоника падающей волны.

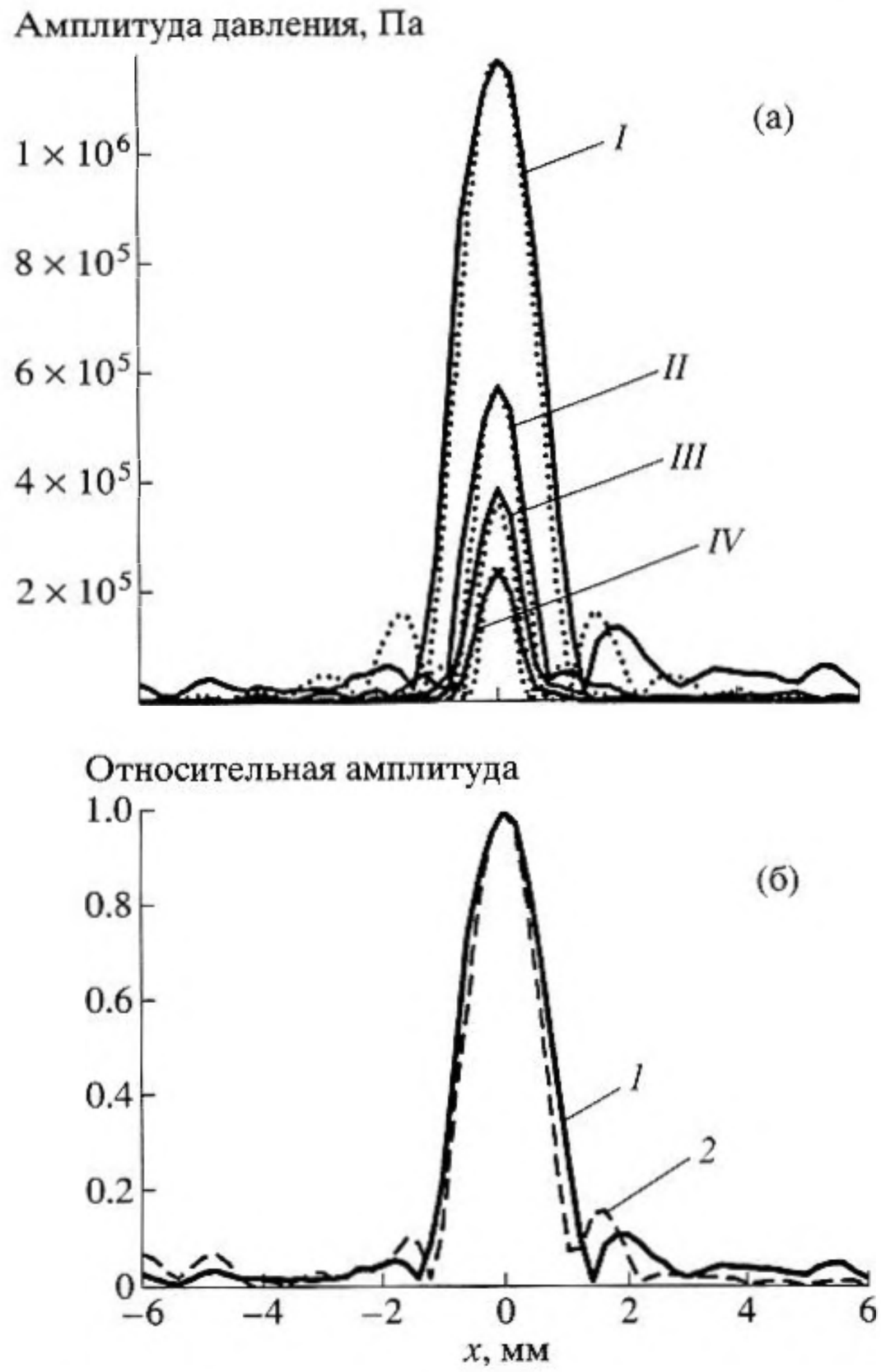

Рис. 5. Поперечное распределение давления в обращенном пучке при $z = 82$ мм. а – амплитуды гармоник. Сплошные линии – эксперимент, пунктирные линии – расчет. *I* – *IV* – номера гармоник с частотами соответственно $2f = 6$ МГц, 4 = 12 МГц, $6f = 18$ МГц и $8f = 24$ МГц. б – сравнение экспериментальных данных по ОВФ-фокусировке с помощью обращения *I* и *II* гармоники. *1* – обращается II гармоника падающей волны ($2f = 6$ МГц), *2* – обращается основная гармоника линейной падающей волны частотой 6 МГц.

ширина главного максимума и относительный уровень боковых компонент уменьшаются с ростом номера гармоники. Временной профиль падающей волны в фокальной точке имел характерные нелинейные искажения, при этом амплитуды гармоник $2f$, $3f$ и $4f$ составляли соответственно 15.6, 3.5% и 2.8% амплитуды первой.

На рис. 4 приведены измеренные распределения основной гармоники обращенной волны (частота $2f$) в сравнении с обращаемой компонентой (второй гармоникой) падающей волны. Видно, что в целом обращенная волна воспроизводит поле второй гармоники падающей волны. Обращенный пучок является сфокусированным. Ширина фокального максимума фундаментальной компоненты обращенного пучка и его осевое положение практически не отличаются от того, что имеется во второй гармонике падающего пучка. Отметим, что полученные зависимости качественно соответствуют аналитической оценке для гауссова пучка (рис. 1). Распределения давления первых четырех гармоник обращенного пучка ($2f$, $4f$, $6f$, $8f$) в плоскости $z = 82$ мм и вдоль оси пучка показаны на рис. 5 и рис. 6 соответственно. Видно, что данные фокальных измерений гармоник (рис. 5а) хорошо согласуются с численной моделью. Расчетные и экспериментальные кривые осевых распределений для облегчения восприятия приведены отдельно на рис. 6а и рис. 6б. При общей похожести они имеют некоторые расхождения, которые заключаются в смещении измеренных точек максимумов гармоник в сторону излучателя по сравнению с их расчетными положениями. Причиной этого эффекта может быть наличие не учтенных в модели многократных

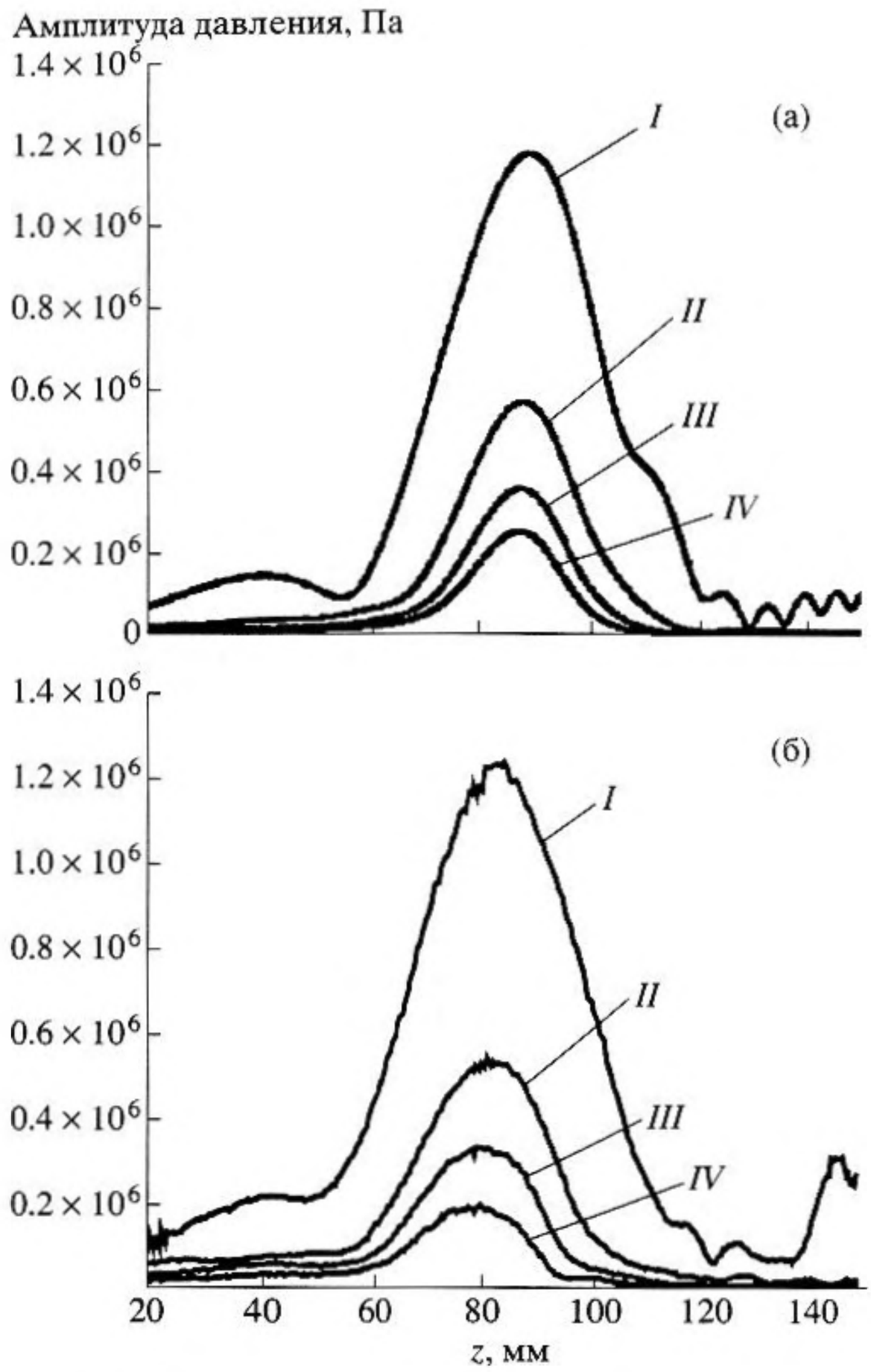

Рис. 6. Зависимости амплитуд давления первых четырех гармоник обращенного пучка от продольной координаты. а – расчет, б – эксперимент. z – расстояние от излучателя. I – IV – номера гармоник с частотами соответственно $2f$ = 6 МГц, $4f$ = 12 МГц, $6f$ = 18 МГц и $8f$ = 24 МГц.

внутренних отражений ультразвукового импульса в ОВФ-элементе, приводящих к рождению волн, в том числе и параметрически не связанных с накачкой. Указанная неидеальность реальных ОВФ-систем будет предметом дальнейших исследований.

На рис. 5б дополнительно представлено сравнение фокального распределения, измеренного при ОВФ второй гармоники ($2f$ = 6 МГц), и случая, когда волна частотой 6 МГц генерируется непосредственно излучателем. При общей схожести кривых, первый вариант дает чуть большую ширину главного максимума, с одновременным небольшим ослаблением боковых максимумов.

Таким образом, численно и экспериментально исследовано параметрическое обращение волнового фронта второй гармоники сфокусированного ультразвукового пучка. Продемонстрировано, что поле обращенной волны является также сфокусированным и в целом хорошо воспроизводит поле второй гармоники падающей волны. Данные измерений удовлетворительно согласуются с результатами численного моделирования. За счет использования ОВФ гармоник можно построить системы ОВФ-акустоскопии с повышенным разрешением. При одинаковой частоте обращенной волны, системы с ОВФ второй гармоники могут иметь преимущество по сравнению с использованием ОВФ фундаментальной компоненты за счет уменьшения реверберации при распространении, из-за пониженного относительного уровня боковых максимумов во второй гармонике падающей волны и их ослабления в обращенной волне. При достаточном усилении обращенной волны, обеспечивающем ее нелинейное распространение назад к источнику, акустическое изображение можно получать с использованием ее гармоник, например, на учетверенной по отношению к падающей волне частоте, с соответствующим повышением разрешения.

Работа выполнена при финансовой поддержке Американского фонда гражданских исследований и разработок для независимых государств бывшего Советского Союза (Civilian Research and Development Foundation, CRDF, RP2-2367-MO-02). Частичная финансовая поддержка российских авторов предоставлена Российским фондом фундаментальных исследований (проекты № 00-15-96636, 02-02-16916), фондом международных программ научного сотрудничества Франции (Programmes Internationaux de Cooperation Scientifique, PICS 1573) и российско-французской программой PAI-RUSSIER Dossier № 04585TK. Дополнительная финансовая поддержка американских авторов предоставлена также Американским центром военно-морских исследований (U.S. Office of Naval Research).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Лямшев Л.М., Саков П.В.* Обращение волнового фронта при нелинейном рассеянии звука на пульсирующей сфере // Акуст. журн. 1988. Т. 34. № 1. С. 127–134.
2. *Брысев А.П., Крутянский Л.М., Преображенский В.Л.* Обращение волнового фронта ультразвуковых пучков // УФН. 1998. Т. 168. № 8. С. 877–890.
3. *Брысев А.П., Бункин Ф.В., Крутянский Л.М., Преображенский В.Л., Пыльнов Ю.В., Стаховский А.Д.* Автофокусировка ультразвука на случайно распределенные рассеивающие объекты в жидкости с помощью параметрического обращения волнового фронта // Письма в ЖЭТФ. 1995. Т. 61. № 6. С. 454–458.

4. *Brysev A.P., Bunkin F.V., Stakhovsky A.D., Krutyansky L.M., Preobrazhensky V.L., Pyl'nov Yu.V.* Parametric phase conjugation of an ultrasonic wave scattered from a solid into liquid. Bulletin of the Russian Academy of Sciences. Physics // Supplement Physics of Vibrations. 1995. V. 59. № 1. P. 40–46.

5. *Yamamoto K., Ohno M., Kokubo A., Sakai K., Takagi K.* Acoustic phase conjugation by nonlinear piezoelectricity. II. Visualization and application to imaging systems // J. Acoust. Soc. Amer., 1999. V. 106 (3). P. 1339–1345.

6. *Brysev A., Krutyansky L., Pernod P., Preobrazhensky V.* Acoustic microscope based on magneto-elastic wave phase conjugator // Appl. Phys. Lett. 2000. V. 76. P. 3133–3135.

7. *Averkiou M.A., Roundhill D.N. and Powers J.E.* A new imaging technique based on the nonlinear properties of tissues // in Proc. of the 1997 IEEE Ultrason. Symp., edited by Schneider S.C. et al., IEEE. 1997. V. 2. P. 1561–1566.

8. Nonlinear Acoustics, edited by Hamilton M.F. and Blackstock D.T. Boston: Academic Press, 1998. P. 245.

9. *Бункин Ф.В., Власов Д.В., Кравцов Ю.А.* К вопросу об обращении волнового фронта звука с усилением обращенной волны // Кв. эл–ка. 1981. Т. 8. № 5. С. 1144–1145.

10. *Брысев А.П., Бункин Ф.В., Крутянский Л.М., Преображенский В.Л., Пыльнов Ю.В., Стаховский А.Д.* Параметрическое обращение фронта ультразвуковых волн в воде в широком угловом диапазоне // Акуст. журн. 1997. Т. 43. № 2. С. 244–247.

11. *Брысев А.П., Крутянский Л.М.* Улучшение качества фокусировки при параметрическом обращении фронта ультразвуковых пучков в элементе с рельефной рабочей поверхностью // Акуст. журн. 2000. Т. 46. № 4. С. 447–450.

12. *Cunningham K.B., Hamilton M.F., Brysev A.P. and Krutyansky L.M.* Time-reversed sound beams of finite amplitude // J. Acoust. Soc. Amer. 2001. V. 109. P. 2668–2674.

Parametric Phase Conjugation for the Second Harmonic of a Nonlinear Ultrasonic Beam

A. P. Brysev, F. V. Bunkin, M. F. Hamilton*, R. V. Klopotov, L. M. Krutyanskii, and K. Yan*

Wave Research Center, General Physics Institute, Russian Academy of Sciences, ul. Vavilova 38, Moscow, 119991 Russia
e-mail: brysev@orc.ru

**Department of Mechanical Engineering, Texas University, Austin, Texas, 78712-1063 USA*
e-mail: hamilton@mail.utexas.edu

Abstract—The effect of phase conjugation for the second harmonic of a focused ultrasonic beam was investigated experimentally and by numerical simulation. An ultrasonic pulse with the carrier frequency $f = 3$ MHz was emitted into water and focused at a point between the source and the phase conjugating system. The phase conjugation for the second harmonic of the incident wave ($2f = 6$ MHz) was performed in a magnetostrictive ceramics as a result of the parametric interaction of the incident wave with the pumping magnetic field (the pumping frequency was $f_p = 4f = 12$ MHz). The axial and focal distributions of sound pressure in the incident and conjugated beams were measured using a broadband PVDF membrane hydrophone. The corresponding calculations were performed by solving numerically the Khokhlov–Zabolotskaya–Kuznetsov (KZK) equation allowing for the nonlinearity, diffraction, and thermoviscous absorption. The results of measurements agreed well with the calculations and showed that the field of a conjugate wave adequately reproduces the field of the second harmonic of the incident wave. A certain advantage of focusing with the phase conjugation for the second harmonic was demonstrated in comparison with the operation at the doubled frequency of the incident wave. The results of this study can serve as the basis for the utilization of the phase conjugation of harmonics in ultrasonic tomography and nondestructive testing.