

УДК 534.2

## ОСОБЕННОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ УДАРНЫХ ВОЛН В ОГРАНИЧЕННЫХ АКУСТИЧЕСКИХ ПУЧКАХ БОЛЬШОЙ ИНТЕНСИВНОСТИ ПРИ НАЛИЧИИ МЯГКОЙ ГРАНИЦЫ В ОБЛАСТИ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ

*М. С. Дерябин<sup>1\*</sup>, Д. А. Касьянов<sup>1</sup>, В. В. Курин<sup>2</sup>*

<sup>1</sup> Научно-исследовательский радиофизический институт;

<sup>2</sup> Нижегородский госуниверситет им. Н. И. Лобачевского, г. Нижний Новгород, Россия

Работа посвящена экспериментальным исследованиям взаимодействия интенсивных акустических полей с границами раздела сред. В частности, обсуждаются результаты экспериментальных исследований пространственного изменения профиля и эволюции спектра интенсивной акустической волны, отражённой от акустически-мягкой границы. Расстояние между апертурой излучателя и поверхностью примерно соответствовало координате последнего дифракционного максимума осевого распределения поля на частоте накачки. Интенсивность излучения подбиралась таким образом, чтобы обеспечить нелинейное взаимодействие волн как до, так и после отражения. Показано, что противофазное взаимодействие между гармониками в отражённой волне, сформированной до границы, и гармониками, формирующимися после отражения, приводит к существенному изменению профиля и спектра отражённой волны, что определяет дальнейшее формирование нелинейных волн. Распространение отражённой волны сопровождается интенсивным нарастанием амплитуды сигнала в фазе сжатия и формированием нового ударного фронта. В распределении амплитуд гармоник наблюдается монотонность спада в зависимости от их номера. По мере удаления от границы эта особенность поведения спектра отмечается во всё более низкочастотной его части.

### ВВЕДЕНИЕ

При распространении акустических волновых полей в ограниченных средах часто проявляются специфические эффекты, связанные с изменением свойств отражающих границ под действием падающего поля. Например, известно, что воздействие интенсивного ультразвука на границу раздела жидких сред приводит к «незвуковыми» возмущениям [1, 2]. В частности, к возбуждению гравитационно-капиллярных волн, взаимодействие с которыми приводит к явлению вынужденного рассеяния звука, подобного вынужденному рассеянию Манделштама—Бриллюэна в оптике. Звук, взаимодействуя с этими возмущениями, увеличивает их амплитуду, что в свою очередь приводит к ещё более сильному рассеянию звука. Как показано в работе [3], состояние акустически-мягкой границы можно классифицировать в зависимости от интенсивности и длительности падающего на неё акустического поля и ввести критерий, при выполнении которого границу можно считать невозмущённой даже при отражении ударной волны.

Известно, что при распространении акустических волн в виде слаборасходящихся пучков с большой интенсивностью и достаточно большими числами Рейнольдса формируется ударная волна. При этом совместное действие дифракционных и нелинейных механизмов приводит к тому, что амплитуда волны в фазе сжатия значительно превышает амплитуду в фазе разрежения, см., например, [4]. В нелинейной акустике, в частности в медицинских её приложениях, особый интерес представляет задача о генерации мощных импульсов, в которых амплитуда волнового давления в фазе разрежения превышала бы амплитуду в фазе сжатия.

\* mmm1984@inbox.ru

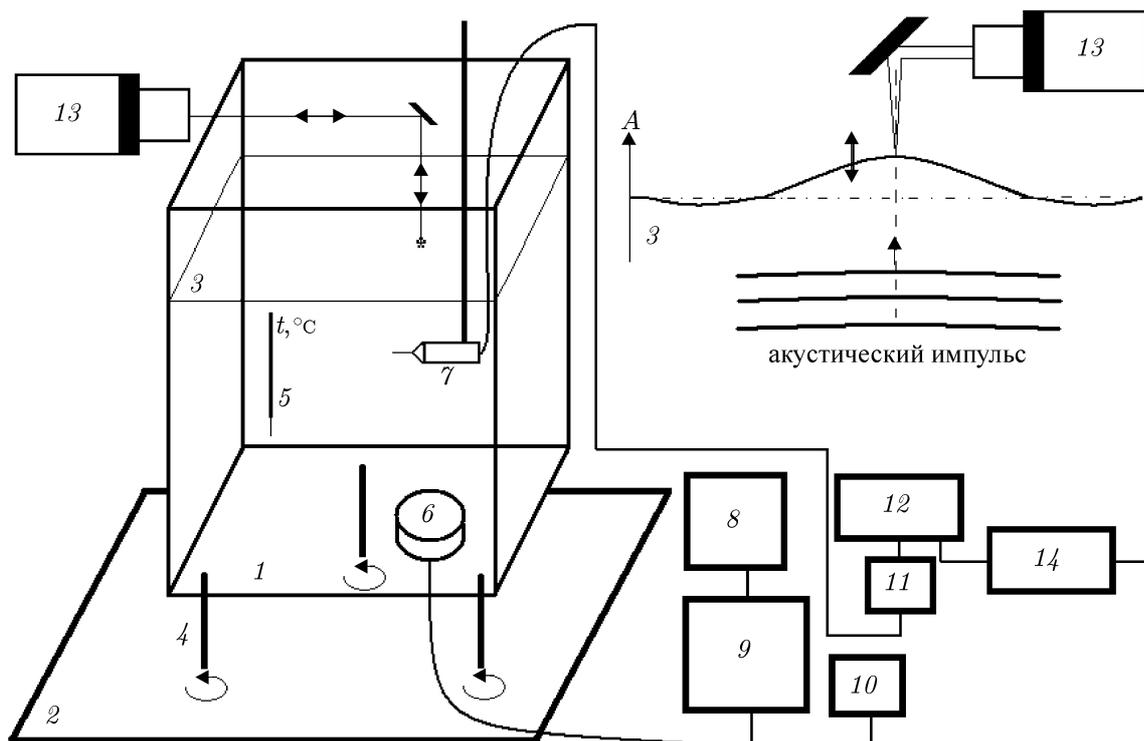


Рис. 1

Одной из возможностей создать такой сигнал является отражение ударной волны от акустически-мягкой границы. Экспериментальным исследованиям подобной ситуации и посвящена данная работа. В работе обсуждаются результаты экспериментальных исследований пространственного изменения профиля и спектра волны накачки на оси распространения отражённого пучка с большой интенсивностью, нормально падающего на границу раздела вода—воздух (пучок формируется плоским излучателем).

Отметим, что при определённых условиях наличие свободной границы в области взаимодействия нелинейных ударных акустических волн приводит к постепенному рассасыванию ударного фронта, а затем к его новому формированию. Этот эффект связан с противофазным взаимодействием высокочастотных гармоник в нелинейной волне, образовавшихся до и после отражения от границы [5]. При этом конкуренция нелинейных волн, возникающих до и после отражения от свободной поверхности, проявляется не только в высокочастотной части спектра. В частности, подобный механизм взаимодействия нелинейных волн накачки формирует более узкий угловой спектр излучения волны разностной частоты в параметрических источниках звука [5].

## 1. ОПИСАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ УСТАНОВКИ

На рис. 1 представлена блок-схема установки, на которой проводились исследования профиля волны накачки. Для измерений использовались миниатюрные PVDF-гидрофоны.

Эксперименты осуществлялись в ванне 1, имеющей форму параллелепипеда со сторонами  $300 \times 150 \times 700$  мм (где 700 мм — высота ванны), изготовленной из прозрачного пластика, установленной на массивном основании 2 (см. рис. 1). В ванну наливалась хорошо отстоявшаяся прокипячённая вода, тщательно очищенная от механических примесей. Толщина слоя воды в ходе экспериментов поддерживалась постоянной. Параллельность плоскости излучателя и поверхно-

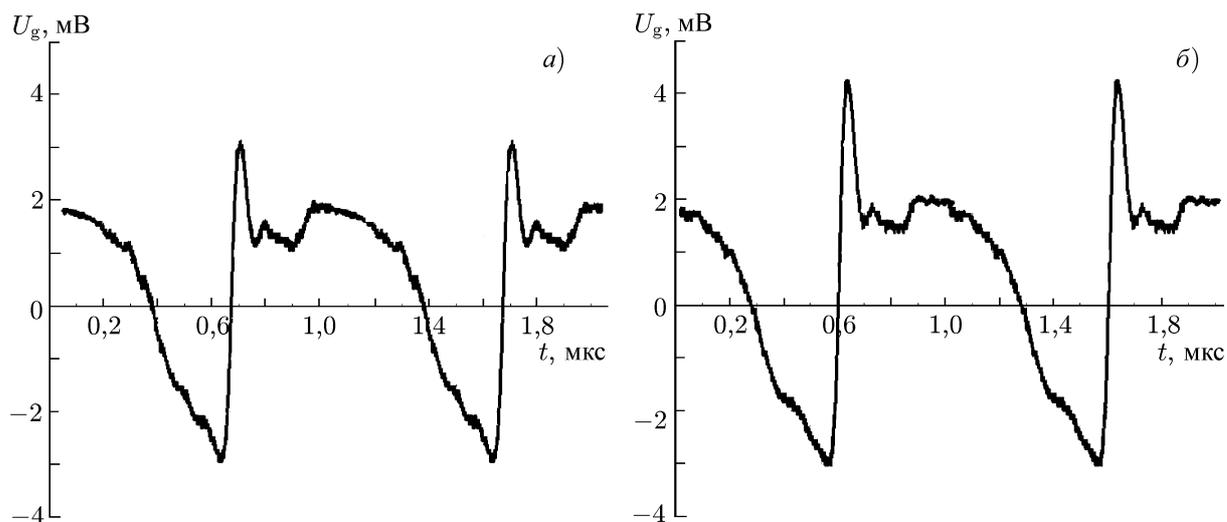


Рис. 2

сти воды 3 достигалась регулировкой опорных микровинтов 4. Температура контролировалась при помощи термометра 5 с точностью  $0,1^\circ\text{C}$ .

В экспериментах использовался вмонтированный в дно ванны плоский пьезокерамический излучатель 6 с диаметром апертуры  $D = 4,5$  см, работающий в импульсном режиме. Длительность импульсов и частота излучения во всех экспериментах были фиксированными и составляли  $\tau = 20,0$  мкс и  $f_0 = 1,00$  МГц соответственно. При этой апертуре и частоте излучения последний максимум осевого распределения поля излучателя расположен на 8 см ниже поверхности воды. Временные профили нелинейных волн в произвольной точке отражённого пучка регистрировались миниатюрным калиброванным гидрофоном 7 фирмы «Precision Acoustics» с размером активного элемента  $\delta = 0,04$  мм, имеющим заводские калибровки в диапазоне до 20 МГц. Устройство перемещения гидрофона обеспечивало точность позиционирования не хуже 0,1 мм по всем координатам.

Излучающая часть установки состоит из задающего генератора 8 («Tektronix AFG3022»), высококачественного усилителя мощности 9 («Amplifier Research 800A100A», уровень нелинейных искажений выходного сигнала не более  $-20$  дБ) и контрольного цифрового осциллографа 10 («Tektronix TDS3032B»). Интенсивность излучения и расстояние между апертурой излучателя и поверхностью воды подбирались таким образом, чтобы обеспечить продолжение эффективного нелинейного взаимодействия волн после отражения. Максимальное число Рейнольдса, достигнутое в экспериментах, составило  $Re = 620$ . Принятый сигнал с гидрофона 7, усиленный блоком 11 кондиционирующих усилителей (HP1, DC3, HA2 фирмы «Precision Acoustics»), регистрировался и предварительно анализировался осциллографом 12 («Tektronix DPO4032»). Для непосредственных измерений колебаний поверхности воды в установку был включён оптический канал, состоящий из лазерной головки «OFV505» 13 и виброметра «OFV5 000» 14 с доплеровским декодером VD02 фирмы «Polytec».

## 2. О ВЛИЯНИИ ИНТЕНСИВНОГО УЛЬТРАЗВУКОВОГО ПОЛЯ НА АКУСТИЧЕСКИ МЯГКУЮ ГРАНИЦУ

В работе [3] экспериментально исследованы некоторые особенности влияния возмущений границы раздела жидкость—газ на пространственную трансформацию профиля нелинейных волн в отражённом от этой границы интенсивном акустическом пучке (при различных параметрах из-

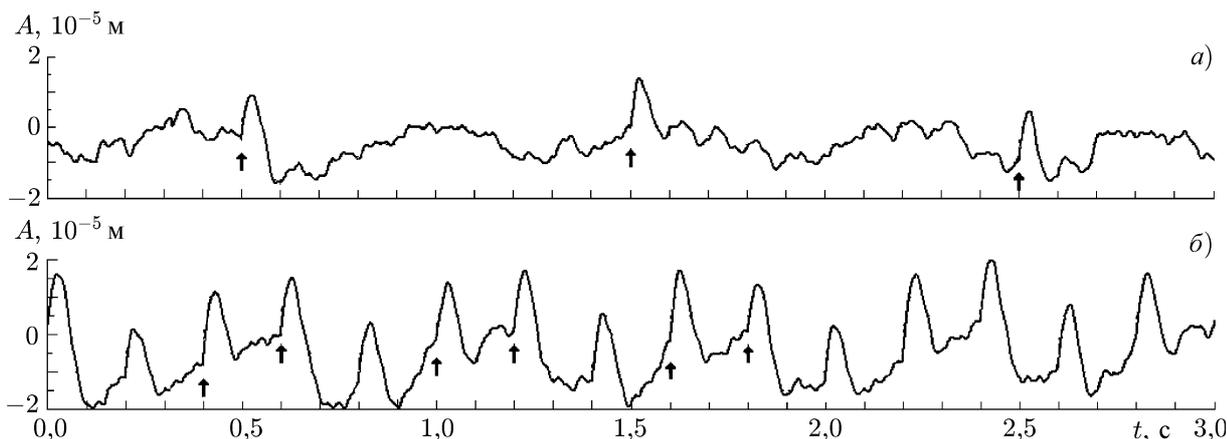


Рис. 3

лучения). Показано, что эти возмущения существенным образом влияют на фазовые соотношения между гармониками в отражённой нелинейной волне, что изменяет её структуру и динамику формирования. Также в работе проведены измерения амплитуды смещений поверхности жидкости, вызванных падающими акустическими импульсами. Измерения проводились двумя методами: акустическим и оптическим. Исследовались зависимости амплитуды смещений от скважности и интенсивности падающих импульсов.

Анализ профилей отражённых нелинейных волн и их спектрального состава показал, что регистрируемые сигналы существенным образом зависят не только от интенсивности импульсов накачки, но и от их скважности. Так, на рис. 2 представлены временные профили нелинейных волн в отражённом пучке (два периода на несущей частоте) на расстоянии 10 см от границы вода—воздух для частот повторения импульсов 5 Гц (а) и 200 Гц (б). Здесь и далее  $U_g$  — напряжение на гидрофоне,  $t$  — время. Как видно из рис. 2, амплитуда формирующейся после отражения области сжатия при высокой частоте повторения в 1,4 раза превышает аналогичную амплитуду на частоте 5 Гц. По всей видимости, это указывает на более эффективное взаимодействие гармоник в нелинейной волне в данном случае.

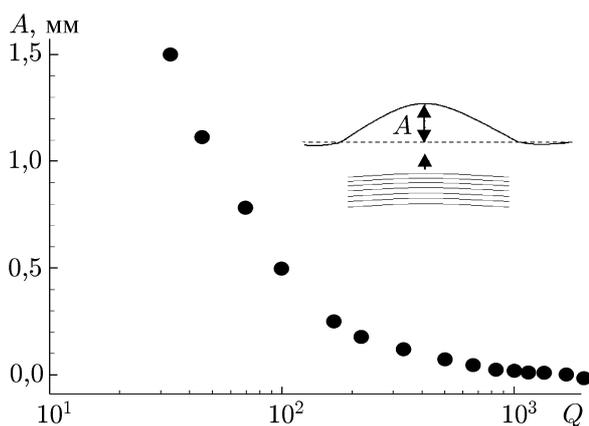


Рис. 4

Очевидно, что, в зависимости от интенсивности и скважности импульсов накачки, воздействие интенсивным акустическим полем должно приводить либо к генерации гравитационно-капиллярных волн, либо к стационарному искривлению поверхности.

Для более детального исследования колебаний поверхности воды использовался лазерный виброметр. На рис. 3 изображены осциллограммы колебаний поверхности воды, полученные с помощью лазерного виброметра при периодах следования импульсов  $T_c = 1$  с (а) и  $T_c = 0,2$  с (б), амплитуда и длительность импульсов накачки были фиксированы. Моменты воздействия акустических импульсов на границу раздела вода—воздух указаны стрелками. Из рис. 3 видно, что в данном случае поверхность реагирует на воздействие переколебанием с длительностью примерно 100 мс и амплитудой, не превышающей 0,02 мм.

При периоде следования сигнала менее 100 мс происходит стационарное осесимметричное

искривление поверхности. Возникающее при этом фокусирующее «зеркало» увеличивает эффективность взаимодействия гармоник в отражённой нелинейной волне вблизи границы вода—воздух. Характерное отклонение  $A$  поверхности воды от состояния равновесия на акустической оси излучателя от скажности излучения  $Q$  представлена на рис. 4. При периоде следования сигнала  $T_c = 1$  мс отклонение  $A$  поверхности составляло примерно 1,5 мм, что сопоставимо с длиной волны сигнала накачки. Погрешность измерений не превышала 0,1 мм.

Таким образом, условия отражения интенсивных нелинейных волн существенно различаются. В работе [3] было экспериментально определено, что для условий данного эксперимента отражение происходит практически от невозмущённой гладкой поверхности при скажности сигнала больше  $10^5$ . Именно этот режим излучения использовался в данной работе.

### 3. О КОРРЕКТНОЙ РЕГИСТРАЦИИ ПРОФИЛЯ УДАРНЫХ ВОЛН

В нелинейных экспериментах с накачкой в мегагерцовом диапазоне серьёзное внимание необходимо уделять корректной регистрации профиля ударных волн в слаборасходящихся звуковых пучках. Эксперименты, в которых исследуется нелинейное взаимодействие акустических волн, предполагают в первую очередь предварительную калибровку излучающего тракта, а также обеспечение гидрофонами (с известной чувствительностью) приёма сигналов в широкой полосе частот, перекрывающей частоты десятков гармоник исходной волны накачки. В работе [6] также показано, что для воспроизводимости результатов экспериментов необходимо выполнить ещё одно условие: размер активного элемента гидрофона должен быть значительно меньше характерных поперечных размеров парциальных (на каждой из гармоник) неоднородностей поля в пучке. В противном случае форма профиля принимаемой нелинейной волны зависит от пространственной ориентации гидрофона, что может привести к неверной интерпретации полученных результатов. В частности, в работе [6] продемонстрировано, что получить достоверные данные о профиле нелинейных волн на частотах накачки порядка 1 МГц возможно лишь гидрофонами с размером активного элемента менее 0,1 мм. В данной работе используется гидрофон с диаметром апертуры  $\delta = 0,04$  мм, и полученные данные можно считать достоверными.

В экспериментах данной работы были использованы игольчатые PVDF-гидрофоны, чтобы достичь максимального пространственного разрешения. Согласно паспортным данным производителя, в заводских условиях подобные гидрофоны калибруются следующим образом. Спектр принимаемого ими сильно нелинейного сигнала в области стабилизации формы волнового фронта (сигнал излучался плоским излучателем и изначально имел синусоидальную форму) сравнивается со спектром  $1/n$ , где  $n$  — номер гармоники.

Калибровка подобных гидрофонов, особенно с учётом фазы падающего поля, достаточно сложна. Применяемые методы (см., например, [7, 8]) ограничены характерными для этого типа гидрофонов особенностями. Во-первых, фазы гармоник регистрируемого поля сильно чувствительны к ориентации плоскости приёмной апертуры относительно падающего волнового фронта. Отсюда возникают сложности при позиционировании гидрофона, особенно с воспроизводимостью этого позиционирования. Во-вторых, те же фазы зависят от интенсивности падающего поля, т. е. возникают колебания в конструкции гидрофона при падении на него интенсивного акустического поля. Эти колебания неконтролируемо меняют взаимное положение падающего волнового фронта и плоскость чувствительного элемента гидрофона.

Проблема «фазовой» калибровки игольчатых PVDF-гидрофонов подробно обсуждается, например, в работе [9], где сравниваются результаты тестов для различного типа гидрофонов. А именно, мембранного гидрофона, для которого имеется полная амплитудно-частотная характеристика, и игольчатого PVDF-гидрофона, у которого фазовая неравномерность амплитудно-

частотной характеристики учтена как погрешность калибровки по амплитуде. Восстановление волновых фронтов в результате деконволюции сигналов, записанных с помощью этих гидрофонов, даёт весьма близкие результаты. Проведённые в работе [9] тесты позволяют предполагать, что профили ударных волн, полученных в представляемых экспериментах, близки к реальным.

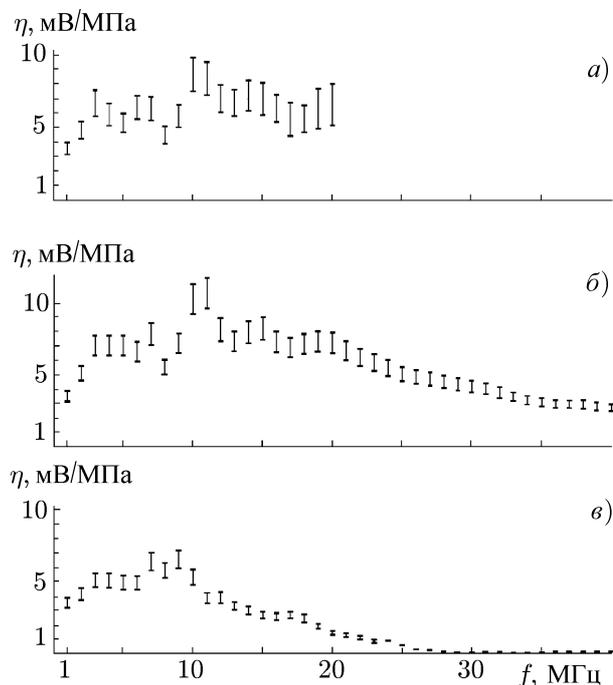


Рис. 5

Гидрофон, используемый в экспериментах, в заводских условиях калиброван в полосе до 20 МГц в положении, когда падающий волновой фронт параллелен плоскости, содержащей чувствительный элемент гидрофона. Расположение гидрофона в экспериментах (см. рис. 1) отличается от его положения при заводской калибровке. В связи с этим была проведена калибровка гидрофона в положении, когда нормаль к апертуре гидрофона перпендикулярна нормали к падающему волновому фронту. Перекалибровка была проведена методом, близким к заводскому, при этом частотный диапазон калибровки был расширен до 40 МГц.

Заводская калибровка используемых гидрофонов приведена на рис. 5а, погрешность составляет 13÷22 % ( $\eta$  — чувствительность гидрофона). Данные перекалибровки для положения, когда фронт волны параллелен плоскости, содержащей чувствительный элемент гидрофона, приведены на рис. 5б, погрешность составляет 10 %.

Заводская калибровка и калибровка, полученная авторами до 20 МГц в лабораторных условиях, соответствуют друг другу в пределах погрешности. На рис. 5в приведены данные перекалибровки для положения, когда фронт волны перпендикулярен плоскости, содержащей чувствительный элемент гидрофона, погрешность составляет 10 %.

#### 4. РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

На рис. 6 представлены результаты абсолютных измерений амплитуд давления  $P$  в фазах сжатия ( $P > 0$ ) и разрежения ( $P < 0$ ) в нелинейных акустических волнах на оси пучка в зависимости от расстояния  $z$  от апертуры излучателя. Вертикальной прямой на расстоянии 43 см отмечено местоположение границы вода—воздух. Индексами а1–а5 и b1–b5 отмечены расстояния, на которых проводился спектральный анализ временного профиля формирующихся ударных волн, представленных на рис. 7 и 8 соответственно. Белыми треугольниками на рис. 6 изображены результаты измерений амплитуд в фазах сжатия и разрежения в нелинейных акустических волнах, распространяющихся без отражения, от излучателя к поверхности воды, расположенной на расстоянии  $z = 70$  см, соответствующие профили и их спектры представлены на рис. 7. Осциллограмма а1 соответствует расстоянию 28 см от апертуры излучателя, а2 — 35 см, а3 — 46 см, а4 — 54 см и а5 — 58 см. Чёрными треугольниками представлены результаты для отражённой волны, соответствующие профили и их спектры представлены на рис. 8. Осциллограмма b1 соответствует пройденному волной суммарному расстоянию в 45 см (43 см от излучателя до поверхности воды и ещё 2 см вниз от границы раздела после отражения), b2 — 51 см, b3 — 58 см, b4 — 65 см и b5 — 71 см. На рис. 7 и 8 представлены осциллограммы сигналов, принятых гидрофоном (панели а),

так и результаты пересчёта в абсолютные значения давления  $P$  с помощью калибровочной кривой, представленной на рис. 5в (панели б). Осциллограммы принимаемых сигналов приведены для того, чтобы подчеркнуть изменения формы профилей ударных волн, вызванных пересчётом. На рис. 7в и 8в приведены десятичные логарифмы амплитуд спектральных гармоник, нормированных на амплитуду первой гармоники  $A_1$ , сплошной линией изображена функция  $A_1/n$ , где  $n$  — номер гармоники сигнала.

Максимум амплитуды волны, распространяющейся в безграничном водном пространстве в условиях представленного эксперимента, расположен на удалении 35 см от апертуры излучателя (точка a2 на рис. 6). В этой точке сигнал приобретает форму практически ударного импульса, что соответствует многочисленным результатам других экспериментальных исследований — см., например, [10]. Причём амплитуда в фазе сжатия по модулю примерно в пять раз превышает амплитуду в фазе разрежения. Дальнейшее увеличение дистанции (от точки a2 до точки a5, см. рис. 6) приводит к монотонному уменьшению амплитуды ударной волны и к стабилизации временного профиля и, как следствие, спектра. В точке a1, где формирование пространственно однородного временного профиля ударной волны ещё не завершено, спектральные компоненты, соответствующие высшим гармоникам, весьма невелики, и их амплитуды не подчиняются закону  $A_n \propto 1/n$ .

Из сравнения профиля отражённой от мягкой границы ударной волны, зафиксированного на расстоянии 2 см ниже границы (см. рис. 8б, точка b1), и соответствующего профиля в «безграничном водном пространстве» (см. рис. 7б, точка a2) можно заключить, что эти профили качественно неотличимы (с учётом смены полярности). Отличие наблюдается в экстремальных значениях амплитуд в фазах сжатия и разрежения.

Следует отметить, что в представленном эксперименте на определённой дистанции от мягкой границы амплитуда давления в фазе разрежения в отражённой волне более чем в 3 раза превышала амплитуду в фазе сжатия и достигала значения 1,6 МПа. При этом спектр кардинально отличается от случая распространения идентичного акустического пучка в безграничном пространстве при условии одинаково пройденного расстояния. В спектральные амплитуды в отражённом сигнале существенно немонокотонны в зависимости от номера гармоники. Абсолютный минимум амплитуды отмечен на 15 гармонике (см. рис. 8в, точка b1). По мере увеличения расстояния абсолютный минимум амплитуды смещается в более низкочастотную область спектра. Так, на расстоянии 8 см от границы (см. рис. 8в, точка b2) минимум амплитуды приходится на 14 гармонику, причём относительное изменение амплитуд уже менее выражено.

Необходимо отметить одну особенность трансформации временного профиля ударной волны после отражения от мягкой границы. На профиле отражённой ударной волны формируется высокочастотный пик в фазе сжатия, который по мере удаления от границы растёт (от точки b2 до точки b5, см. рис. 8б) и достигает в представленном эксперименте максимального значения 0,8 МПа на расстоянии 22 см от границы (см. рис. 8б, точка b3). Характерно, что на этой дистан-

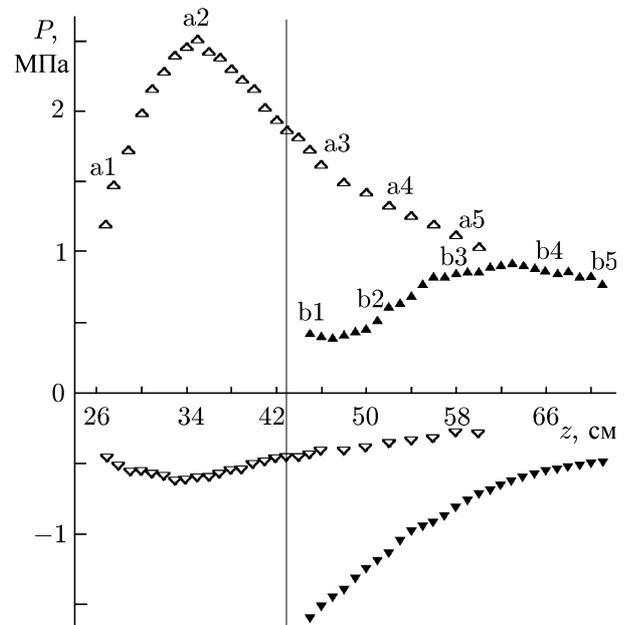


Рис. 6

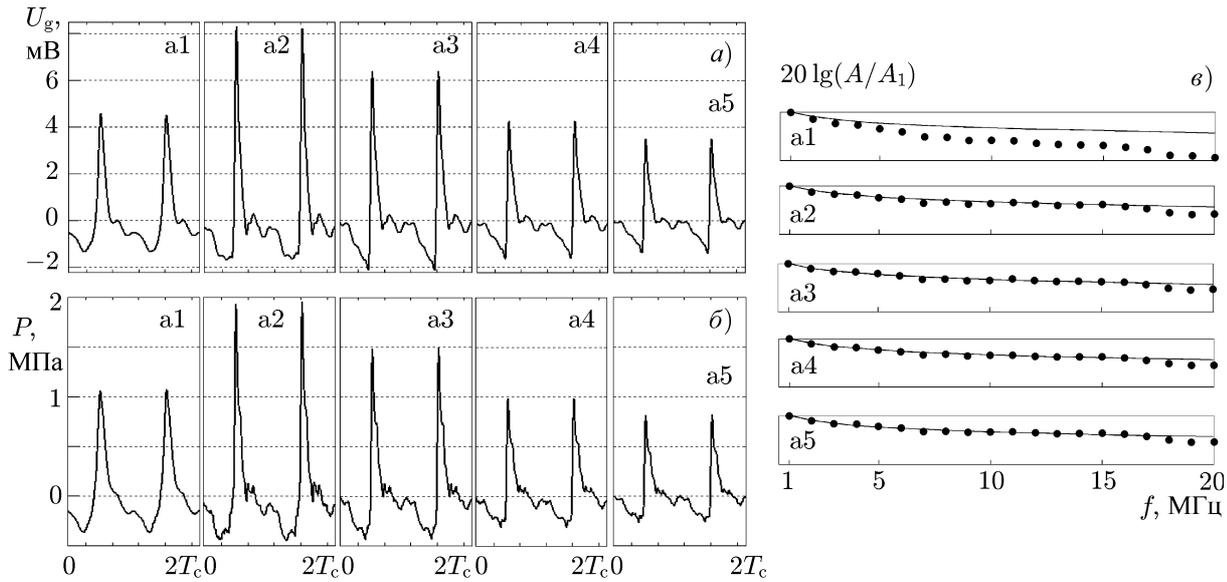


Рис. 7

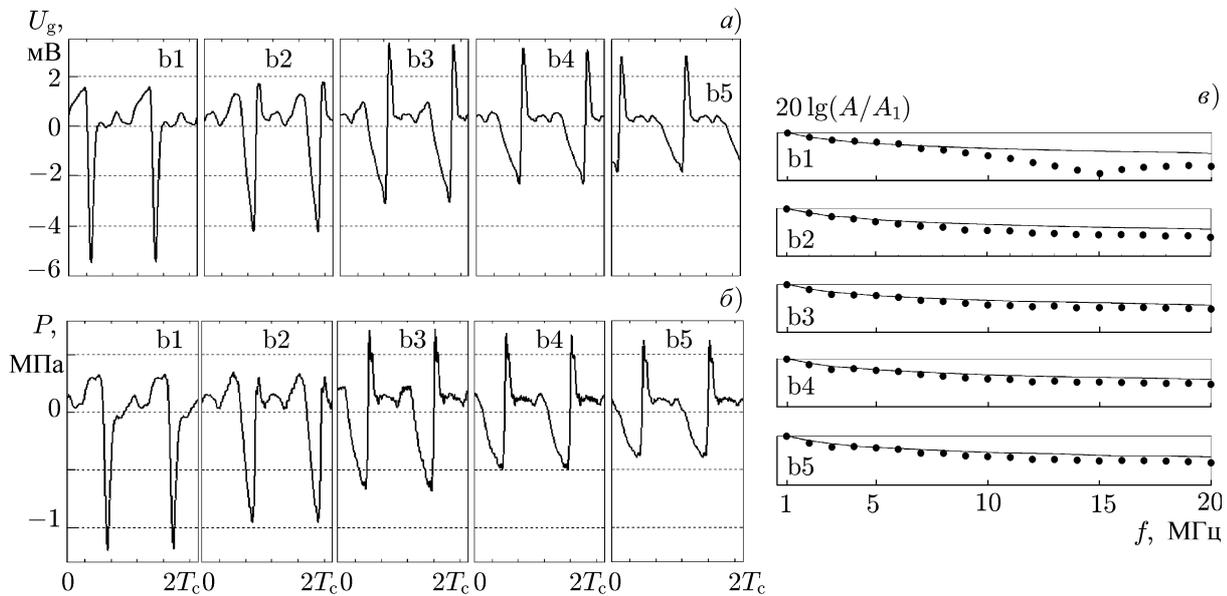


Рис. 8

ции амплитуды в фазах сжатия и разряжения совпадают, см. рис. 6. При дальнейшем удалении от границы вода–воздух профиль отражённой волны стабилизируется. Установившаяся форма профиля ударной волны, сформированной после отражения от мягкой границы, существенно отличается от таковой для случая распространения мощного пучка в безграничном пространстве, ср. рис. 7б и 8б.

### 5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Измеренные временные профили ударных волн несколько отличаются от полученных в некоторых других экспериментах (см., например, [11]), где достаточно близки к приведённым в данной работе. Поэтому необходимо отметить, что измерения в представляемых нами эксперимен-

тах проводились с помощью весьма миниатюрного гидрофона, размеры чувствительной части которого примерно на порядок меньше, чем у гидрофона, используемого в экспериментах [11] или [12]. Таким образом, характерная изрезанность установившегося профиля ударной волны, по всей видимости, отражает реальную ситуацию. Это подтверждается результатами работы [6], где детально сравнивались установившиеся профили ударных волн, регистрируемых гидрофонами с различными размерами чувствительных частей (1; 0,5; 0,2 и 0,04 мм) и при их различной ориентации относительно падающего поля.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (гранты 11-02-00774 и 12-02-31245-мол\_а), Федеральной программы «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России на 2009–2013 гг.» (контракт 02.740.11.0565), гранта Правительства Российской Федерации (договор 11.G34.31.0066), а также Совета при Президенте РФ по поддержке ведущих научных школ (грант НШ-333.2012.2).

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Beyer R. T. // Physical ultrasonics. New York: Academic Press, 1969.
2. Наугольных К. А., Островский Л. А. Нелинейные волновые процессы в акустике. М.: Наука, 1990.
3. Deriabin M., Kasyanov D., Kurin V. // Forum Acusticum, 27 June–1 July 2011, Aalborg. P. 915.
4. Бахвалов Н. С., Жилейкин Я. М., Заболоцкая Е. А. Нелинейная теория звуковых пучков. М., 1982.
5. Новиков Б. К., Тимошенко В. И. Параметрические антенны в гидролокации Л.: Судостроение, 1990. 256 с.
6. Грязнова И. Ю., Дерябин М. С., Касьянов Д. А., Курин В. В. // Сб. тр. науч. конф. «Сессия Науч. совета РАН по акуст. и XXIV сессия Росс. акуст. общ-ва». Т. 1. М.: ГЕОС, 2011. С. 158.
7. ГОСТ Р МЭК 62127-1-2009. Параметры полей ультразвуковых. Общие требования к методам измерений и способам описания полей в частотном диапазоне от 0,5 до 40 МГц.
8. ГОСТ Р МЭК 62127-2-2009. Гидрофоны. Общие требования к методам калибровки в частотном диапазоне до 40 МГц.
9. Hurrel A. // J. Phys. Conf. Ser. 2004. V. 1. Advanced Metrology for Ultrasound in Medicine. P. 57.
10. Руденко О. В., Сапожников О. А. // Успехи физ. наук. 2004. Т. 174, № 9. С. 973.
11. Sapozhnikov O., Khokhlova V., Cathinol D. // J. Acoust. Soc. Am. 2004. V. 115, No. 5. P. 1982.
12. Nachef S., Cathinol D., Tjotta J., et al. // J. Acoust. Soc. Am. 1995. V. 98, No. 4. P. 2303.

Поступила в редакцию 17 сентября 2013 г.; принята в печать 18 ноября 2013 г.

### FEATURES OF THE SHOCK-WAVE FORMATION IN HIGH-INTENSITY BOUNDED ACOUSTIC BEAMS IN THE PRESENCE OF A SOFT BOUNDARY IN THE INTERACTION REGION

*M. S. Deriabin, D. A. Kasyanov, and V. V. Kurin*

This paper is devoted to experimental studies of interaction between intense acoustic fields and their interfaces. In particular, we discuss the results of experimental studies of the spatial variation of the profile and spectrum evolution of an intense acoustic wave reflected from an acoustically soft boundary. The distance between the source aperture and the surface approximately corresponds to the coordinate

of the last diffraction maximum of the axial distribution of the acoustic field at the pump frequency. The radiation intensity was chosen in such a way as to ensure the nonlinear wave interaction both before and after the reflection. It is shown that antiphased interaction between harmonics in the reflected wave formed before the boundary and the harmonics formed after the reflection leads to a significant variation in the profile and spectrum of the reflected wave, which determines the further formation of nonlinear waves. Propagation of the reflected wave is accompanied by an intense rise in signal amplitude in the compression phase and the formation of a new shock-wave front. A nonmonotonic decay as a function of the harmonic number is observed in the harmonic amplitude distribution. This feature in the behavior of the spectrum takes place in its increasingly low-frequency part as the distance from the boundary increases.