

УДК 535.375:534.321.9

РЕКОНСТРУКЦИЯ НЕЛИНЕЙНОГО ПРОФИЛЯ ДАВЛЕНИЯ УЛЬТРАЗВУКОВОГО ПУЧКА В ВОДЕ ПО СИГНАЛАМ ЛИДАРА КОМБИНАЦИОННОГО РАССЕЯНИЯ

© 2021 г. С. М. Першин¹, *, А. П. Брысев¹, М. Я. Гришин¹,
В. Н. Леднёв¹, А. Ф. Бункин¹, Р. В. Клопотов¹

¹Федеральное государственное бюджетное учреждение науки “Федеральный исследовательский центр
“Институт общей физики имени А.М. Прохорова Российской академии наук”, Москва, Россия

*E-mail: pershin@kapella.gpi.ru

Поступила в редакцию 09.12.2020 г.

После доработки 25.01.2021 г.

Принята к публикации 26.02.2021 г.

Выполнена лидарная реконструкция нелинейного профиля давления в фокусе ультразвукового пучка, излученного в воду на частоте 2.0 МГц и имеющего ударный фронт с амплитудой 50 МПа. Это оказалось возможным за счет установленной связи между степенью деформации полосы валентных колебаний О–Н в спектре комбинационного рассеяния света в воде, амплитудой упругого рассеяния и давлением в точке зондирования. Профиль, полученный с помощью лидара, хорошо соответствует профилю, измеренному PVDF-гидрофоном.

DOI: 10.31857/S036767652106020X

ВВЕДЕНИЕ

Диагностика акустических полей, особенно предельно высоких интенсивностей, вплоть до кавитационного разрыва сплошности, всегда находилась в области повышенного внимания исследователей. При этом особый интерес проявлялся к развитию дистанционных оптических методов, которые позволяют визуализировать ультразвуковые поля и фронты [1, 2], а также проводить диагностику, когда применение прямых методов, например, с использованием гидрофонов, невозможно или затруднено. В работе [3] теоретически исследована корреляция значения амплитуды локального акустического давления в жидкости с параметрами лазерного излучения, рассеянного на флуктуациях оптической плотности в области сжатия–разрежения. Реконструкция волнового профиля акустической волны может быть реализована, например, за счет анализа спектра дифракции света на ультразвуке [2, 4] и последующем решении обратной задачи, однако, получаемый при этом результат не всегда однозначен.

В данной работе для прямой реконструкции профиля давления, имеющего в фокусе ультразвукового (УЗ) пучка характерный ударный фронт, была использована величина сдвига центра огибающей полосы валентных колебаний О–Н при комбинационном рассеянии (КР) лазерных импульсов в воде (далее в тексте сокращенно – О–Н полоса

КР), а также амплитуда упругого (рэлеевского) рассеяния в области акусто-оптического взаимодействия. Такой выбор обусловлен результатами работ [5–7], в которых такой сдвиг был обнаружен в воде при сжатии статическим [5, 6], а также переменным акустическим давлением ~4 МПа в фокусе УЗ пучка умеренной интенсивности [7]. Было установлено, что изменение давления проявляется в несимметричной деформации, огибающей О–Н полосы КР из-за перестройки структуры водородосвязанных комплексов в воде [8]. При этом осталось неясным, будет ли деформация огибающей полосы валентных О–Н колебаний молекул воды в спектре КР однозначно обратимой и линейной при увеличении давления до нескольких десятков мегапаскалей в фокусе УЗ пучка высокой интенсивности. Таким образом, поиск ответа на этот вопрос и является одной из главных целей настоящей работы.

Следует также отметить, что сдвиг гравитационного центра О–Н полосы КР, как это ранее было статистически обосновано [9], является наиболее чувствительным параметром количественного измерения деформации О–Н полосы воды по сравнению с другими методами анализа, например, деконволюцией составными гауссовскими кривыми [5]. В работе [11] было показано, что физический смысл сдвига центра О–Н полосы КР в воде – это изменение энтропии. В акустическом

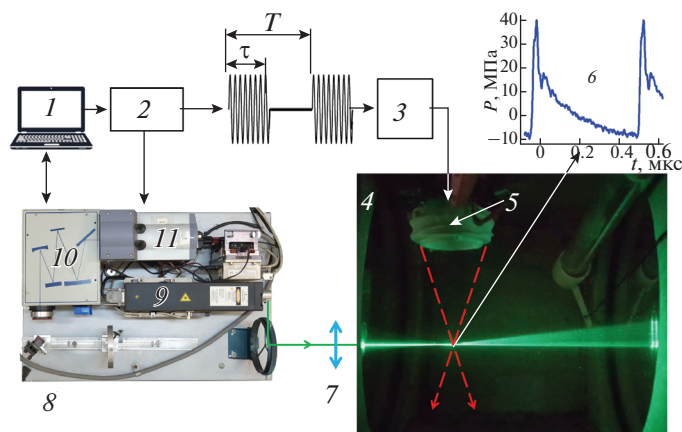


Рис. 1. Схема экспериментальной установки: 1 – персональный компьютер, 2 – двухканальный функциональный генератор произвольных волновых форм Tektronix AFG3102, 3 – система из трех последовательно включенных усилителей мощности с оконечным усилителем OM-POWER OM3500HF (до 3.5 кВт), 4 – бассейн с водой, 5 – сфокусированный УЗ-пьезоизлучатель, 6 – один период временного профиля акустического давления, измеренный PVDF-гидрофоном в области перетяжки УЗ пучка на расстоянии 61 мм от пьезоизлучателя, 7 – собирающая линза, 8 – компактный лидар комбинационного рассеяния (9 – импульсный твердотельный Nd:YLiF₄ лазер Laser Compact DTL-319QT, 10 – дифракционный спектрометр SpectraPhysics MS127i, 11 – ПЗС-камера со стробируемым усилителем яркости Andor iStar). Границы УЗ пучка условно показаны желтыми пунктирными линиями. Лазерный пучок условно показан сплошной зеленой линией. $T = 170$ мс – длительность одного цикла работы установки, $\tau = 35$ мкс – длительность ультразвукового радиоимпульса.

пучке умеренной интенсивности сдвиг в сторону низкочастотного крыла был обусловлен увеличением вклада низкочастотных О–Н колебаний крупноразмерных кластеров в огибающую О–Н полосы КР [7]. Отметим здесь отличительную особенность О–Н полосы в спектре КР воды, которая отсутствует в спектрах КР других жидкостей: плечо на низкочастотном крыле отражает вклад крупноразмерных водородосвязанных комплексов [8, 9]. Так, в отличие от давления [7], повышение температуры воды разрушает эти комплексы, уменьшает их вклад в огибающую и увеличивает сдвиг центра О–Н полосы КР в сторону высокочастотного крыла [9–11].

СХЕМА И МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Схема эксперимента, проводившегося в водном бассейне сечением 145×120 мм и высотой 225 мм, представлена на рис. 1. Сфокусированный ультразвуковой пучок создавался пьезокерамическим элементом, имеющим форму сферического сегмента диаметром 28 мм и рабочей частоту $F = 2.0$ МГц. Возбуждение ультразвукового преобразователя осуществлялось радиоимпульсами с периодом следования $T = 170$ мс и длительностью $\tau = 35$ мкс, синтезируемыми в функциональном генераторе Tektronix AFG 3102. Для излучения интенсивного ультразвукового пучка эти радиоимпульсы последовательно усиливались с помощью трех усилителей мощности, при этом в

качестве оконечного использовалась модель OM3500HF производства компании OM-POWER, имеющая выходную мощность до 3.5 кВт.

Параметры ультразвукового поля при указанных значениях возбуждения были предварительно измерены непосредственно с помощью широкополосного (до 30 МГц) звукопрозрачного мембранного PVDF-гидрофона (GEC Marconi) с диаметром пьезоактивной зоны 0.5 мм, закрепленного на цифровом автоматизированном позиционере Weltech BiSlide. Результаты этих измерений показали, что фокальная перетяжка ультразвукового пучка расположена в области 57–70 мм от излучателя, ее диаметр составляет ~ 2.0 мм по уровню 0.7. Временной профиль акустического давления, показанный на рис. 1 (обозначен цифрой 6), зарегистрирован на оси пучка в области его фокальной перетяжки на расстоянии 61 мм от излучателя, а именно в точке, где перепад акустического давления максимален. Вследствие генерации гармоник при распространении в бездисперсионной среде высокоинтенсивного сфокусированного ультразвукового пучка, формируется сильно нелинейный профиль акустического давления с характерным ударным фронтом длительностью не более 30 нс. За этот короткий промежуток времени акустическое давление меняется от фазы разрежения с минимумом давления ~ 10 МПа, до фазы сжатия с максимумом давления ~ 40 МПа. Таким образом, в фокусе ультразвукового пучка суммарный перепад акустического давления на ударном фронте состав-

вил весьма значительную величину ~ 50 МПа. Контроль температуры воды осуществлялся с точностью 0.1°C цифровым терморезистивным термометром, расположенном в углу бассейна, вне светового и ультразвукового пучков.

Для корректной диагностики пространственно-временного профиля ультразвуковой волны в геометрии с перпендикулярно пересекающимися лазерным и ультразвуковым пучками должно выполняться несколько условий. Во-первых, необходима временная синхронизация между ультразвуковыми и зондирующими лазерными импульсами, что достигалось общим для них источником запуска (функциональный генератор 2 на рис. 1). Во-вторых, для хорошего разрешения по времени необходимо, чтобы длительность лазерных импульсов была много меньше периода звуковой волны, равного $F^{-1} = 500$ нс, что для используемого лидара с длительностью лазерного импульса $\tau_l \sim 10$ нс выполнялось с большим запасом. В-третьих, для хорошего пространственного разрешения необходимо, чтобы диаметр зондирующего лазерного пучка был много меньше пространственного периода ультразвуковой волны, равного 745 мкм. Для этого у входного окна бассейна размещалась фокусирующая линза с фокусным расстоянием 60 мм, за счет чего диаметр лазерной фокальной перетяжки в фокальной зоне ультразвукового пучка составлял ~ 75 мкм. Отметим, что в области фокусировки и одновременно пересечения ультразвукового и оптического пучков их волновые фронты имеют практически плоскую форму.

Распространение высокоинтенсивного ультразвукового пучка в воде сопровождается модуляцией ее показателя преломления в соответствии с пространственно-временным профилем давления ультразвукового поля, которое в данном случае характеризуется большими градиентами. Лазерный пучок, диаметр которого много меньше пространственного периода ультразвуковой волны, падая по нормали на такую область, испытывает эффекты рефракции и рассеяния. Фотоны, рассеянные назад из области акусто-оптического взаимодействия, регистрировали многоканальным спектроанализатором со стробируемым детектором. Начальный момент излучения лазерного импульса, задаваемый во втором канале функционального генератора AFG3102, определялся временем задержки, необходимой для того, чтобы ультразвуковой радиоимпульс достиг своей фокальной зоны. Далее задержку между импульсами ультразвука и лазера относительно ее начального значения последовательно увеличивали с шагом 50 нс при зондировании одного периода (500 нс) ультразвуковой волны, либо 20 нс при зондировании ее ударного фронта. Как будет по-

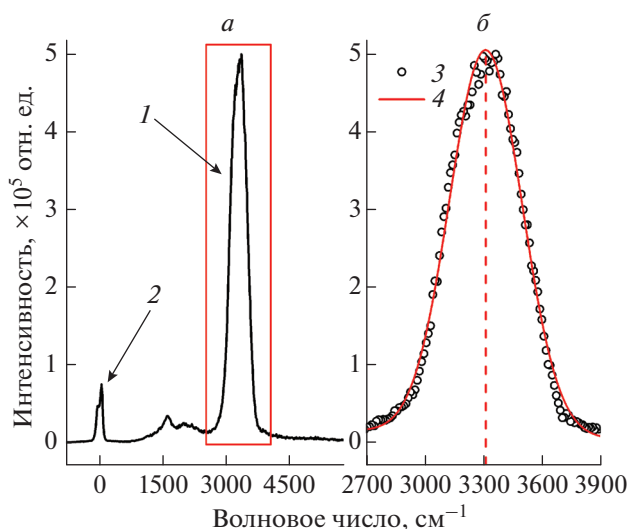


Рис. 2. Спектр комбинационного рассеяния света в воде: 1 – полоса валентных колебаний О–Н, 2 – линия упругого (рэлеевского) рассеяния (а); подробный спектр О–Н полосы КР (область, выделенная на рис. 2а прямоугольником): 3 – экспериментальные данные (точки) и 4 – аппроксимация гауссовой кривой (линия) (б).

казано далее, последующий анализ сдвига центра О–Н полосы КР воды и амплитуды сигнала рэлеевского рассеяния позволял поточечно реконструировать локальный временной профиль в фокусе ультразвукового пучка, распространяющегося в воде.

Для оптического зондирования его профиля использовали лидар, состоящий из импульсного твердотельного лазера с диодной накачкой (Laser Compact DTL-319QT, $\lambda = 527$ нм, длительность импульса 10 нс, энергия в импульсе 200 мкДж, частота повторения импульсов 5 Гц) и дифракционного спектрометра (SpectraPhysics MS127i, спектральный диапазон 500 – 750 нм, спектральное разрешение 0.1 нм), оборудованного ПЗС-камерой со стробируемым усилителем яркости (Andor iStar, мин. длительность строба 5 нс, мин. шаг изменения длительности строба 0.25 нс). Излучение лазера направляли в бассейн с образцом и фокусировали в область перетяжки ультразвукового пучка линзой с фокусным расстоянием 60 мм. Рассеянное назад излучение собирали той же линзой и направляли на входную щель спектрометра лидара. Для каждого значения времени задержки между ультразвуковым и оптическим импульсом проводили регистрацию пяти спектров (см. рис. 2), каждый из которых был получен накоплением по 50 лазерным импульсам с тем, чтобы при дальнейшей обработке вычислить ошибку измерений.

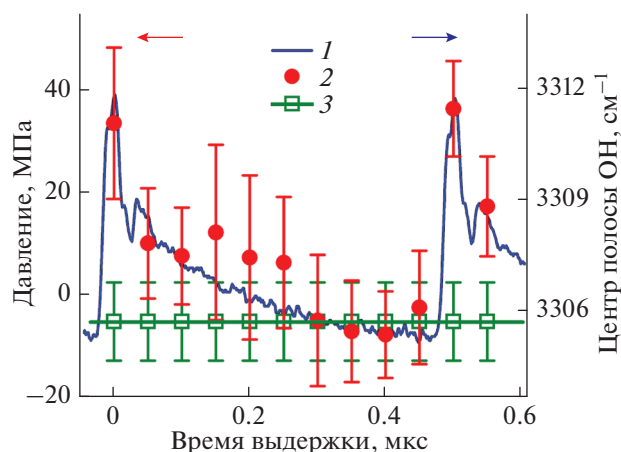


Рис. 3. Лидарная реконструкция одного периода нелинейного профиля УЗ волны. По левой шкале: сплошная линия 1 – волновой профиль, непосредственно зарегистрированный PVDF-гидрофоном в точке лазерного зондирования. По правой шкале: круги 2 – центр О–Н полосы КР в зависимости от задержки в 50 нс между импульсами лазера и ультразвука, квадраты 3 – центр О–Н полосы КР в отсутствии ультразвука.

Обработку зарегистрированных спектров проводили следующим образом. За сигнал упругого (рэлеевского) рассеяния был принят интеграл линии упругого рассеяния (левый пик 2 на рис. 2а) с вычетом фона. Для вычисления гравитационного центра О–Н полосы валентных колебаний (круги 3) на рис. 2б,) ее аппроксимировали гауссовым профилем в области $2500\text{--}4000\text{ см}^{-1}$ (линия 4 на рис. 2б) и вычисляли центр аппроксимирующей кривой. Далее строили зависимости полученных сигналов от величины задержки между ультразвуковым и оптическим импульсами [9, 12].

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

На рис. 3 представлены результаты поточечной (с шагом 50 нс) лидарной реконструкции по сдвигу центра О–Н полосы КР (красные круги 1, шкала справа) профиля одного периода ультразвуковой волны (линия 2, шкала слева), зарегистрированного PVDF-гидрофоном в фокусе ультразвукового пучка. Положение центра О–Н полосы КР в отсутствии ультразвука отмечено зелеными полыми квадратами 3 на рис. 3.

Из рис. 3 видно, что изменения свойств воды в поле интенсивного ультразвукового пучка, которые проявляются в деформации О–Н полосы КР и сдвиге ее центра, хорошо коррелируют с вариацией давления, в том числе и на фронте ударной волны. Естественно ожидать, что увеличение ча-

стоты опроса (т.е. уменьшение значения шага изменения задержки между лазерным и ультразвуковыми импульсами t_{del}) повысит степень совпадения профиля, полученного при оптическом зондировании с профилем, непосредственно измеренным PVDF-гидрофоном.

Однако, повышение частоты следования импульсов лидарного зондирования и равной ей частоты следования ультразвуковых импульсов, очевидно, приводит к повышению их средней мощности и, как следствие, к нагреву воды за счет поглощения ультразвука. Это, в свою очередь, будет сопровождаться изменением скорости ультразвука, вызывающим дрейф фазы частотного наполнения ультразвукового радиоимпульса в точке измерений, а также смещением центра О–Н полосы КР с другим знаком. По этим причинам в эксперименте по более детальной реконструкции профиля акустического давления наряду с уменьшением временного интервала между точками реконструкции до значения $t_{del} = 20\text{ нс}$ одновременно была ограничена временная область зондирования на профиле давления его наиболее динамично изменяющейся частью, содержащей ударный фронт.

На рис. 4 представлены результаты поточечной (с шагом $t_{del} = 20\text{ нс}$) лидарной реконструкции ударного фронта во временном профиле акустического давления в фокусе ультразвукового пучка.

Здесь в зависимости от величины задержки красными кругами (2 на рис. 4б) показан сдвиг центра О–Н полосы комбинационного рассеяния в воде в поле ультразвукового импульса и штрихпунктирной линией (4 на рис. 4б) в его отсутствие. Амплитуда сигнала рэлеевского рассеяния в относительных единицах показана зелеными квадратами (3 на рис. 4б). На оптические данные синей сплошной линией (1 на рис. 4б) наложена соответствующая часть временного профиля ультразвукового пучка (выделена красным прямоугольником на рис. 4б), непосредственно зарегистрированная с помощью PVDF-гидрофона в той же точке поля. На рис. 4б видно, что в пределах погрешности измерений смещение центра О–Н полосы КР воды и амплитуда рэлеевского рассеяния хорошо воспроизводят временной профиль акустического давления на фронте ударной волны, полученный в той же точке с помощью PVDF-гидрофона.

Используя данные на рис. 3 и 4, можно получить количественную оценку чувствительности смещения центра О–Н полосы КР к сжатию-растяжению воды в поле интенсивного ультразвукового поля: она составила $\sim 0.08\text{ см}^{-1}/\text{МПа}$. Следует

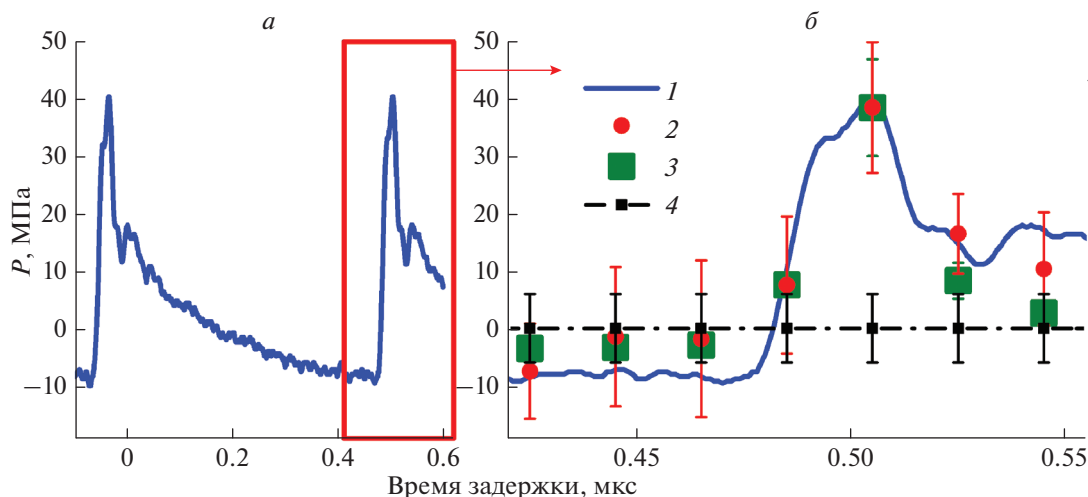


Рис. 4. Результаты поточечной лидарной реконструкции ударного фронта во временном профиле акустического давления в фокусе УЗ пучка. Временной профиль давления в УЗ волне (а), лидарная реконструкция профиля давления ударной волны (выделено прямоугольником на рис. 4а): сплошная линия (б). 1 – Временной профиль давления в УЗ волне, круги 2 – смещение центра О–Н-полосы КР в поле УЗ импульса, квадраты 3 – амплитуда линии рэлеевского рассеяния, штрихпунктирная линия 4 – центр О–Н-полосы КР в отсутствии ультразвука.

также отметить, что амплитуда рэлеевского рассеяния является дополнительным каналом оптического зондирования вариаций давления в фокусе ультразвукового пучка в воде и в других конденсированных средах.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Впервые проведена дистанционная реконструкция нелинейного профиля акустического давления с длительностью ударного фронта не более 30 нс в фокусе ультразвукового пучка в воде по спектрам КР света в воде, измеренным компактным лидаром. Установлено, что наиболее информативным параметром в данном случае является смещение центра О–Н полосы в спектре КР воды от соответствующего равновесного значения. Амплитуда упругого рассеяния является менее чувствительным к изменению давления по сравнению со смещением центра О–Н полосы КР, но остается весьма перспективным диагностическим параметром из-за большего сечения рассеяния, чем у КР. Полученные результаты дают основание полагать, что сокращение длительности зондирующих импульсов лидара, увеличение частоты их повторения, а также уменьшение шага изменения задержки между лазерным и ультразвуковым радиоимпульсом до единиц наносекунд позволит увеличить разрешающую способность предложенного метода дистанционной лазерной диагностики быстропротекающих процессов. В частности, такого рода диагностика ударных фронтов с длитель-

ностью в единицы наносекунд на временном профиле ультразвуковых волн будет эквивалентна использованию гидрофона с гигагерцовой полосой пропускания. Таким образом, полученные результаты служат физической основой нового метода дистанционного мониторинга локальных процессов сжатия–растяжения в воде.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке РНФ (проект № 19-19-00712). Авторы выражают благодарность к.т.н. Л.М. Крутянскому за помощь в технических вопросах и полезные обсуждения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Брысев А.П., Крутянский Л.М., Преображенский В.Л. // УФН. 1998. Т. 168. № 8. С. 877; Brysev A.P., Krutyanskiy L.M., Preobrazhensky V.L. // Phys. Usp. 1998. V. 41. No. 8. P. 793.
2. Брысев А.П., Бункин Ф.В., Гамильтон М.Ф. и др. // Акуст. журн. 1998. Т. 44. № 6. С. 738; Brysev A.P., Bunkin F.V., Hamilton M.F. et al. // Acoust. Phys. 1998. V. 44. No. 6. P. 641.
3. Расковская И.Л. // Письма в ЖЭТФ. 2017. V. 106. № 2. С. 119; Raskovskaya I.L. // JETP Lett. 2017. V. 106. No. 2. P. 131.
4. Шутилов В.А. // Акуст. журн. 1959. Т. 5. № 2. С. 231.
5. Kawamoto T., Ochiai S., Kagi H. // J. Chem. Phys. 2004. V. 120. No. 13. P. 5867.
6. Bunkin A.F., Klinkov V.K., Lukianchenko V. et al. // Phys. Wave Phenom. 2004. V. 12. No. 4. P. 180.
7. Брысев А.П., Бункин А.Ф., Клопотов Р.В. и др. // Опт. и спектроск. 2002. Т. 93. № 2. С. 303; Brysev A.P., Bunkin A.F., Klopotov R.V. et al. // Opt. Spectrosc. 2002. V. 93. No. 2. P. 282.

8. Соколов *Н.Д.* Водородная связь. М.: Наука, 1981. С. 63.
9. Lednev *V.N.*, Grishin *M.Ya.*, Pershin *S.M.* et al. // Opt. Lett. 2016. V. 41. No. 20. P. 4625.
10. Pershin *S.M.*, Bunkin *A.F.* // Phys. Vibr. 1999. V. 7. No. 4. P. 217.
11. Bunkin *A.F.*, Klinkov *V.K.*, Lednev *V.N.* et al. // Appl. Opt. 2012. V. 51. No. 22. P. 5477.
12. Першин *С.М.*, Бункин *А.Ф.* // Опт. и спектроск. 1998. Т. 85. № 2. С. 209; Pershin *S.M.*, Bunkin *A.F.* // Opt. Spectrosc. 1998. V. 85. P. 190.

Reconstruction of the ultrasonic beam nonlinear pressure profile in water using signals of the Raman lidar

S. M. Pershin^{1,*}, A. P. Brysev^{1,#}, M. Ya. Grishin¹, V. N. Lednev¹, A. F. Bunkin¹, R. V. Klopotov¹

¹*Prokhorov General Physics Institute of Russian Academy of Sciences, Moscow, 119991 Russia*

^{*}*e-mail: pershin@kapella.gpi.ru*

A lidar reconstruction of the nonlinear acoustic pressure profile was performed in water in a focused ultrasonic beam radiated at 2.0 MHz frequency with a shock front with 50 MPa amplitude. This was achieved due to the established relationship between the degree of the O–H stretching band deformation in water Raman spectrum, the elastic scattering line amplitude and the local pressure in the sensing point. The pressure profile constructed from the lidar data corresponds well to the profile measured by the PVDF hydrophone.