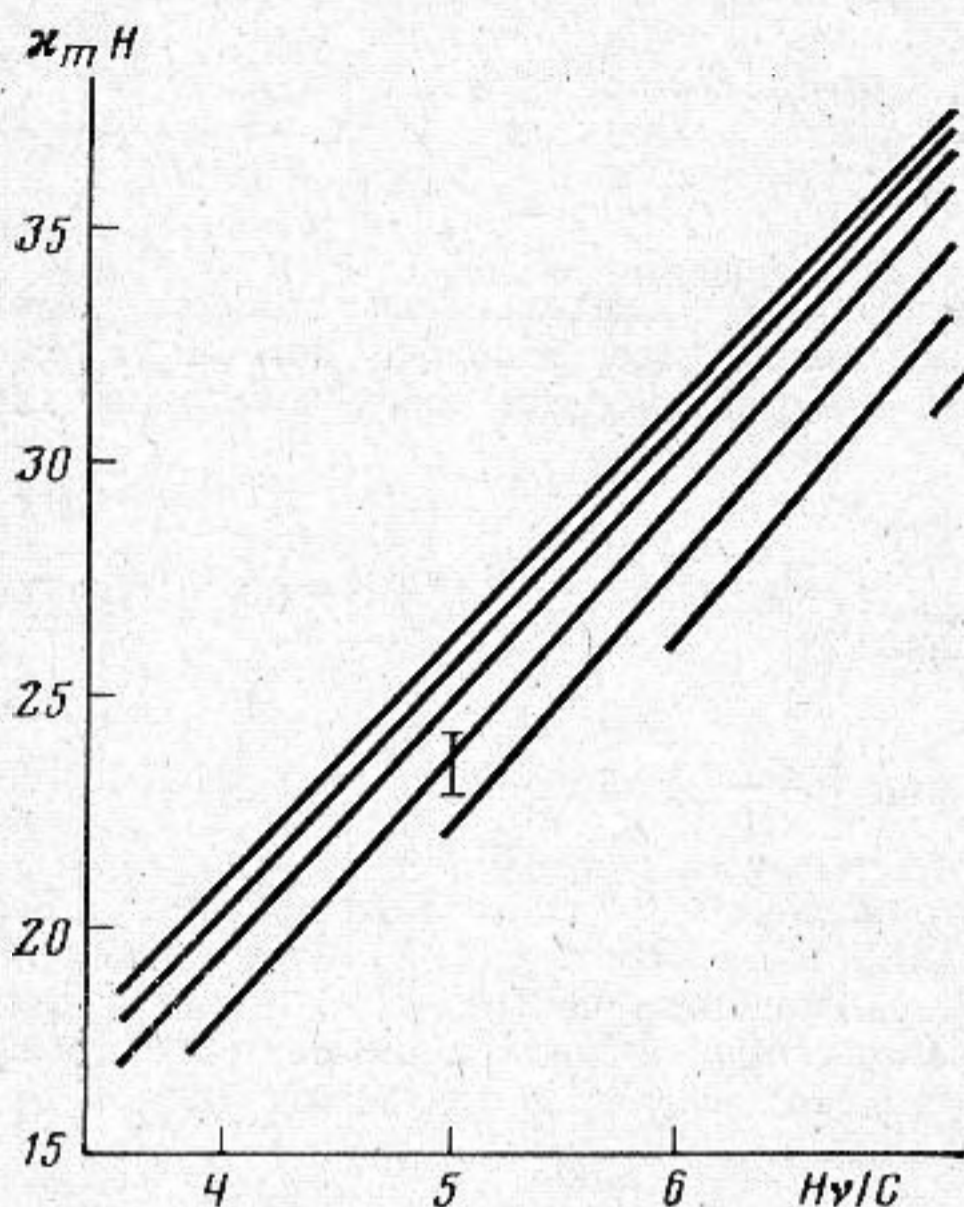


валом усреднения. В нашем случае имеем

$$\delta\Omega = 2\pi/T, \quad \delta\nu = 2\pi/L. \quad (7)$$

Используя (7), получим выражение (4).

Выполнение условия разрешения мод наиболее легко осуществить в мелком море, где число мод невелико, и поэтому соседние моды достаточно далеко отстоят друг от друга. В качестве модели мелкого моря примем двуслойный волновод [6], состоящий из водного слоя толщины H со скоростью звука в нем $c_1 = 1500$ м/с и жидкого полупространства, где $c_2 = 1800$ м/с. Отношение плотностей слоев примем равным 1,8, диапазон изменения частоты в безразмерных единицах $H/\lambda = H\nu/c_1 = 3 \div 6$. В таком



Дисперсионные кривые двуслойного волновода

волноводе возбуждается 7 мод. Расчетные дисперсионные кривые этого волновода приведены на фигуре, где по осям отложены безразмерные величины $H\nu/c_1$ и $\chi_m H$. Предположим, что длина антенны $L = 50 \bar{\lambda}$ и $2H/\bar{\lambda} = 9,0$, $\bar{\lambda}$ — среднее значение длины волны в рассматриваемом диапазоне. Подставляя в (6) численные значения и предположив, что $\sin \theta \sim 1$, получим $H(\chi_m - \chi_{m+1}) > 0,6$. Величина разрешения (ошибка определения χ_m) по оси ν в нашем случае указана на фигуре вертикальным отрезком. Как видно из фигуры, данная ошибка эксперимента позволяет измерить частотную зависимость 5–7 мод. Моды 1–4 сольются в одну линию. Заметим, что амплитуды отдельных мод могут быть равны нулю, дисперсионные кривые этих мод определить не удастся. Точность определения частоты $\nu = \omega/2\pi$ согласно (5) равна

$$(2\pi H/c_1) \delta\nu = (H/c_1) \delta\Omega.$$

При частоте $\nu \sim 100$ Гц и времени анализа $T \sim 2,5$ с получим $\delta(H\nu/c_1) \approx 0,02$. Относительная ошибка определения величин ν и χ_m составляет: $\delta\nu/\nu \approx 0,004$, $\delta\chi_m/\chi_m \approx 0,03$.

Таким образом, приведенный расчет показывает возможность экспериментального определения дисперсионных характеристик некоторых типов волноводов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Елисеенкин В. А. О работе горизонтальной линейной антенны в водном слое. — Акуст. журн., 1979, т. 25, № 2, с. 227–233.
2. Елисеенкин В. А. О работе горизонтальной линейной антенны в мелком море. — Акуст. журн., 1983, т. 29, № 1, с. 44–49.
3. Оптическая обработка информации. Применения/Ред. Кейсесент Д. М. М.: Мир, 1980.
4. Свет В. Д. Об оптическом восстановлении широкополосных акустических голограмм Фурье и Френеля. — Акуст. журн., 1982, т. 28, № 5, с. 685–690.
5. Толстой И., Клей К. С. Акустика океана. М.: Мир, 1969.
6. Бреховский Л. М. Волны в слоистых средах. М.: Изд-во АН СССР, 1957.

Институт прикладной физики
Академии наук СССР

Поступило в редакцию
8.II.1984
после окончательного
исправления
6.VI.1985

УДК 534:535:532.65

О ПОВЕРХНОСТНОМ РЕЗОНАНСНОМ ЭФФЕКТЕ В АКУСТИЧЕСКОЙ ГОЛОГРАФИИ

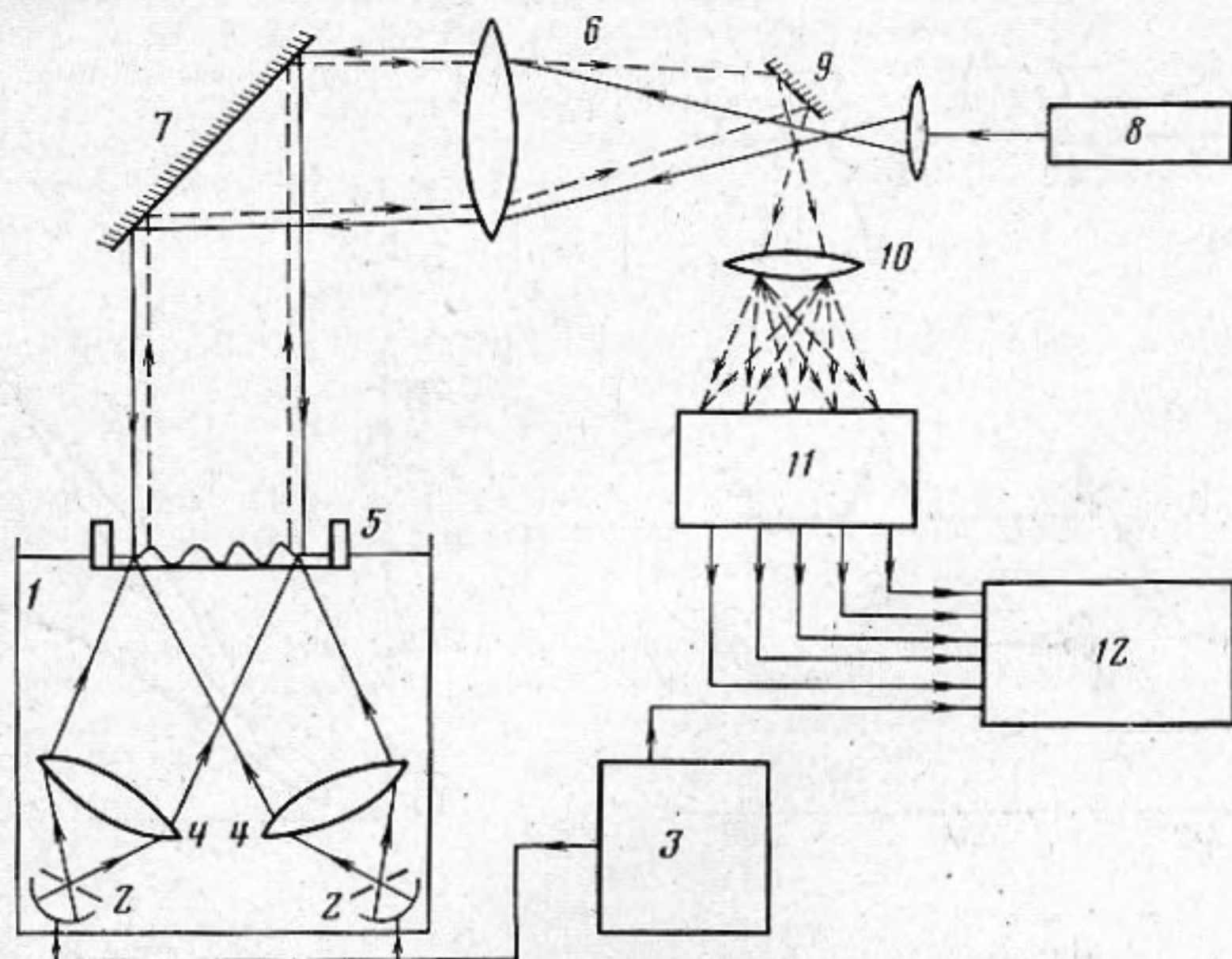
Бакауридзе Г. А., Кения И. Р.

В работе [1] проведен теоретический анализ систем акустической голографии, основанных на методе поверхностного рельефа. Показано, что в случае импульсного возбуждения поверхности жидкости ультразвуком она способна реагировать на более высокие пространственные частоты, нежели при непрерывном режиме возбуждения. Динамика поверхности жидкости под действием акустического реакционного давления рассмотрена также в работе [2].

Однако вопрос о дифракционной эффективности акустических голограмм в зависимости от режимов их формирования в этом подходе не затрагивается. В акустоголографическом эксперименте обычно используют какой-либо один импульсный режим, характеристики которого ограничены применяемой аппаратурой [3-5].

С целью экспериментального исследования дифракционной эффективности как функции режимов импульсного озвучивания была собрана установка, схема которой приведена на фиг. 1.

Два фокусирующих ультразвуковых преобразователя из пьезокерамики ЦТС-22 с резонансной частотой 2,1 МГц помещаются в акустический бассейн и возбуждаются от общего генератора ультразвуковой частоты, имеющего возможность работы в импульсном режиме. Частота следования f и длительность τ импульсов могут варьироваться непрерывно в пределах от 16 до 5000 Гц и от 0,05 до 10 мс соответственно. Для коллимирования ультразвуковых пучков применены акустические



Фиг. 1. Схема экспериментальной установки: 1 - акустический бассейн, 2 - ультразвуковые преобразователи, 3 - генератор импульсного режима, 4 - акустические объективы, 5 - кювета, 6 - оптический коллиматор, 7 - поворотное зеркало, 8 - лазер, 9 - поворотное зеркало, 10 - короткофокусный объектив, 11 - фотоприемная матрица, 12 - быстродействующее самопишущее устройство

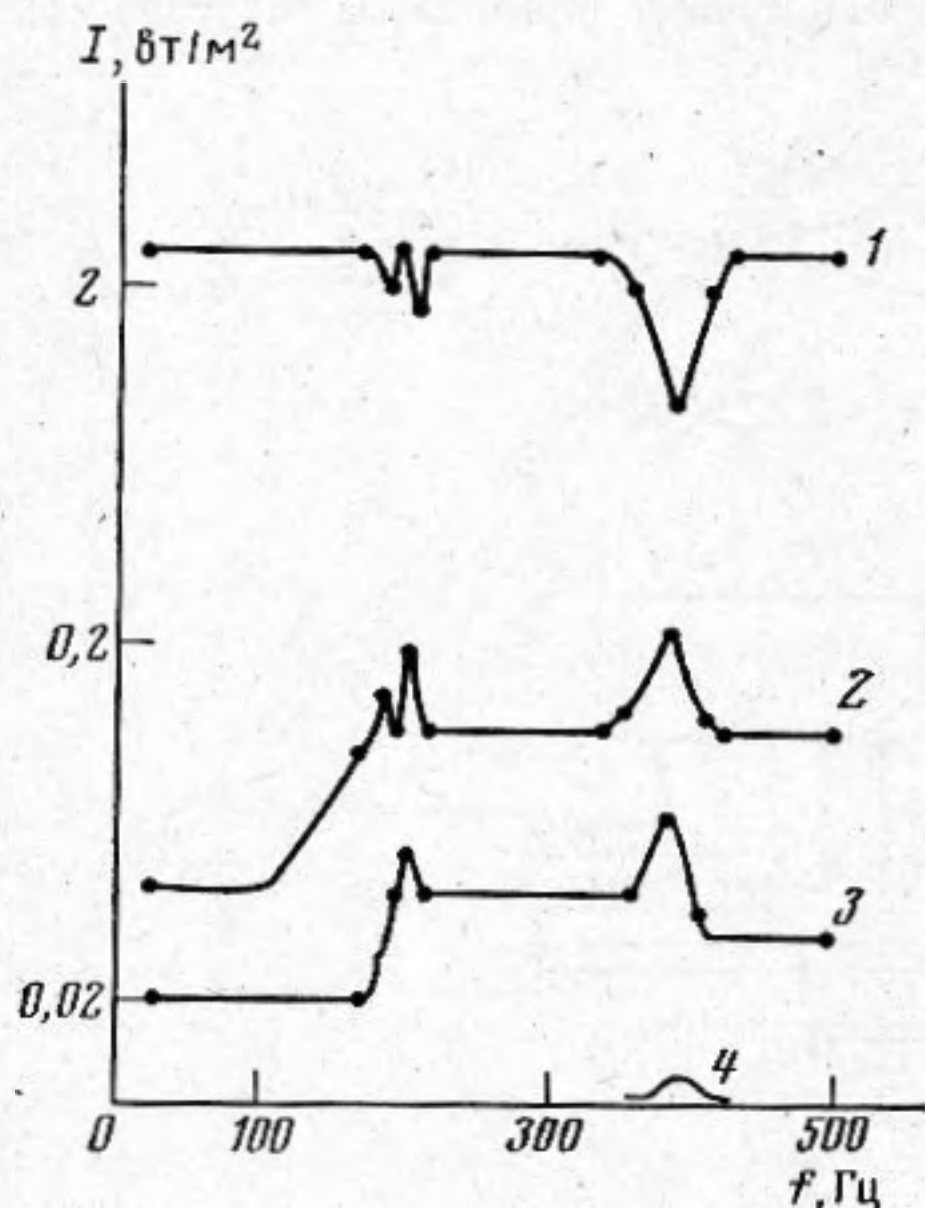
объективы, представляющие собой жидкостные линзы из четыреххлористого углерода с радиусами кривизны ограничивающих поверхностей, обеспечивающих коррекцию по сферической аберрации. Диаметр линз 120 мм, а фокусное расстояние в воде 160 мм. Линзы и преобразователи закрепляются на поворотных рычагах, дающих возможность менять угол встречи θ между ультразвуковыми пучками от 5 до 80° с точностью 2,5°. В плоскости пересечения пучков помещается кювета с звукопрозрачным дном. На поверхности находящейся в ней жидкости формируется рельеф интерференции двух ультразвуковых пучков, который с помощью оптического коллиматора освещается когерентным светом от лазера. Дифрагированные световые пучки снова пройдя объектив коллиматора, выводятся в направлении, перпендикулярном оптической оси, посредством поворотного зеркала, расположенного перед задним фокусом объектива коллиматора.

Система одновременной фотометрической регистрации дифрагированных пучков состоит из фотоприемной матрицы на основе десяти фоторезисторов СФ-2А, расположенных линейно, короткофокусного объектива, фокусирующего каждый порядок дифракции на отдельный элемент фотоприемной матрицы и многоканального быстродействующего самопишущего устройства Н-338. Сигнал снимается с нагрузочных сопротивлений, последовательно подключенных к фоторезисторам. Ввиду того что люкс-амперная характеристика данных фоторезисторов нелинейна и чувствительность их различна, проводилась калибровка смещения пера самописца в зависимости от интенсивности I падающего света для каждого канала.

В кювету помещалась жидкость, глубина которой выбиралась из условия $d \sin \theta / \Lambda > 0,25$, где d - глубина жидкости, а Λ - длина волны ультразвука в ней. Обычно $d \approx 3$ мм. На генераторе устанавливался импульсный режим с минимальной частотой следования импульсов 16 Гц, после чего частота следования плавно увеличивалась до 5000 Гц. Сигнал с фотоприемной матрицы фиксировался на диаграмме многоканального самопишущего устройства, один из каналов которого служил для регистрации частоты следования импульсов. Измерения проводились во всем диапазоне углов встречи через каждые 5° и использовались различные жидкости.

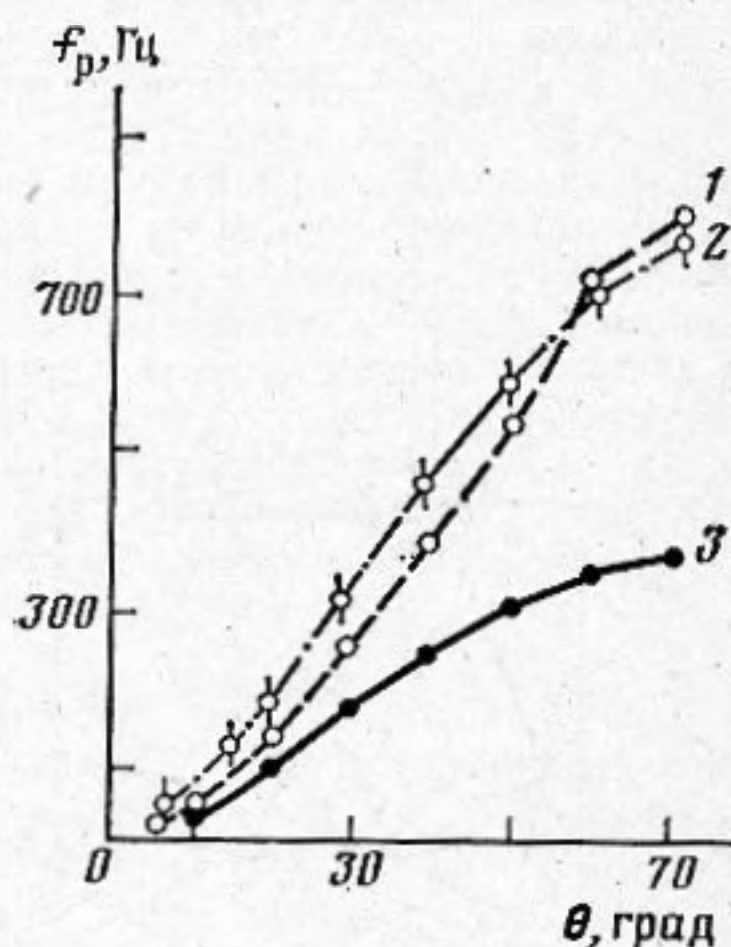
Как показали эксперименты, при изменении частоты следования ультразвуковых импульсов на некоторых частотах f_p , зависящих от угла встречи θ ультразвуковых пучков, частоты ультразвука F и параметров жидкости (плотности ρ , коэффициента поверхностного натяжения γ , вязкости η) наблюдается резкое увеличение интенсивности дифрагированного света при одновременном уменьшении интенсивности нулевого порядка дифракции. Уменьшение длительности импульсов τ не влияло на значения f_p и в экспериментах обычно использовалась $\tau=0,1$ мс.

Были получены кривые, описывающие зависимость интенсивности дифрагированного света от частоты следования ультразвуковых импульсов, показывающие наличие пиков интенсивности. Характерно, что для малых θ наблюдалось несколько пиков, причем наибольшим был пик, соответствующий наивысшей f_p . С увеличением θ количество пиков уменьшалось и для $\theta > 60^\circ$ наблюдался только один пик.



Фиг. 2

Фиг. 2. Зависимость интенсивности дифрагированного света от частоты следования ультразвуковых импульсов для свободной поверхности воды, при $\theta=30^\circ$ и $F=2,1$ МГц. 1-4 соответствуют 0, ± 1 , ± 2 , и ± 3 порядкам дифракции



Фиг. 3

Фиг. 3. Зависимость резонансной частоты от угла встречи ультразвуковых пучков для свободной поверхности воды (1), ртути (2) и кремнеорганического масла ПМС-10 (3). $F=2,1$ МГц

Во всех случаях пикам интенсивности дифракционных порядков сопутствовало резкое уменьшение интенсивности нулевого порядка, что свидетельствует о перераспределении световой энергии в высшие порядки дифракции. Характер кривых для различных жидкостей не менялся, однако для более вязких жидкостей пики более пологи. Существенно, что для разных жидкостей f_p различны.

Глубина жидкости выбиралась из условия $(d \sin \theta / \Lambda) > 0,25$ для того, чтобы на поверхности могли существовать капиллярно-гравитационные волны. При меньших глубинах пики интенсивности отсутствовали, что, очевидно, связано с демпфированием поверхностных волн дном кюветы. Увеличение глубины более 3 мм практически не влияло на величины пиков и значения f_p .

В качестве примера на фиг. 2 приведен график зависимости интенсивности дифрагированного света от частоты следования импульсов в полулогарифмическом масштабе для свободной поверхности воды, угла встречи $\theta=30^\circ$ и частоты ультразвука $F=2,1$ МГц. В первых порядках пики интенсивности наблюдаются при $f_{p1}=185$ Гц, $f_{p2}=205$ и $f_{p3}=390$ Гц. Вторые порядки имеют два выраженных пика при f_{p2} и f_{p3} , а третьи порядки наблюдаются лишь при f_{p3} . Нулевой порядок дифракции имеет минимумы при всех f_p .

Кривые получены при освещении поверхности светом гелий-неонового лазера ($\lambda=633$ нм). Аналогичные кривые были получены при использовании гелий-кадмиевого лазера ($\lambda=442$ нм), причем в обоих случаях f_p близки.

Наблюдаемый в эксперименте эффект в самых общих чертах может быть интерпретирован следующим образом: индуцированный акустическим полем поверхностный рельеф фактически можно рассматривать как отражательную фазовую решетку. Когда один ультразвуковой пучок падает на поверхность нормально, а второй под углом θ , постоянная решетки $b=\Lambda/\sin \theta$. Глубина рельефа h определяет дифракционную эффективность этой решетки [6]. Простой расчет показывает, что

при h , удовлетворяющей условию

$$h(1 + \cos \varphi) + \frac{b}{2} \sin \varphi = n\lambda, \quad (1)$$

где φ — угол дифракции, $n=0, \pm 1, \pm 2, \dots$, и λ — длина волны света, дифракционная эффективность максимальна. Повысить дифракционную эффективность за счет увеличения интенсивности ультразвука на описанной выше экспериментальной установке не удалось. Это, по-видимому, связано с тем, что зависимость глубины рельефа от интенсивности ультразвука, выражаемая сверткой интенсивности с функцией импульсного отклика поверхности жидкости, нелинейна относительно пространственной частоты распределения интенсивности [7]. С ростом интенсивности растет однородное вспучивание всей поверхности, тогда как глубина рельефа, имеющего высокую пространственную частоту, почти не увеличивается. Однако если возбуждать поверхность жидкости импульсами с определенной частотой следования, можно добиться увеличения глубины рельефа без повышения интенсивности. Причиной этого, вероятно, является импульсный характер формирования поверхностного рельефа, позволяющий рассматривать его как поверхностную волну с длиной $\Lambda_n = b$ [1]. Такой волне, согласно дисперсионному соотношению для капиллярно-гравитационных волн, соответствует частота [8]

$$\omega_n^2 = \left(gk + \frac{\gamma}{\rho} k^3 \right) \text{th}(kd), \quad (2)$$

где $\omega_n = 2\pi f_n$ и $k = 2\pi/\Lambda_n$. Для $d > 0,25 \Lambda_n$, $\text{th}(kd) = 1$ и частота не зависит от глубины жидкости. Когда частота следования импульсов f отлична от f_n , амплитуда поверхностной волны мала, но при $f = f_n$ в результате резонанса она приближается к значению, определяемому условием (1). Измеренную в эксперименте частоту следования импульсов при которой наступает резонанс, обозначим через f_p . По аналогии с фазовой рельефографией, где максимум дифракционной эффективности можно достичь подбором толщины слоя в зависимости от периода растра [9], здесь максимум дифракционной эффективности достигается подбором частоты следования ультразвуковых импульсов, хотя механизмы достижения оптимальной глубины рельефа различны. На фиг. 3 приведены зависимости f_p от θ для свободной поверхности различных жидкостей. Возможно применение описанного эффекта для определения различных параметров жидкостей. Расчет f_p дает удовлетворительное согласие с экспериментом. Например, для воды $\gamma = 72 \cdot 10^{-3} \frac{H}{M}$ $\rho = 10^3$ кг/м³, при $\theta = 30^\circ$ и $F =$

$= 2,1$ МГц, $\Lambda_n = 1,42$ мм и $f_n = 400$ Гц. Эксперимент в этом случае дает значение $f_p = 390$ Гц. Наличие нескольких пиков дифракционной эффективности, очевидно, связано с нелинейным характером (2). В заключение отметим, что использование резонансного эффекта позволяет повысить дифракционную эффективность в 5–10 раз по сравнению с любым другим режимом возбуждения поверхности, что является важным для задач акустоголографической визуализации.

Авторы благодарят Ш. Д. Какичашвили за руководство работой, а также А. П. Кофмана за полезные обсуждения.

ЛИТЕРАТУРА

1. Pille P., Hildebrand V. P. Rigorous analysis of the liquid surface acoustical holography system.— Acoustical Holography. Plenum Press, New — York — London, 1974, v. 5, p. 335–371.
2. Анапьев В. А., Домаркас В. И., Саяускас С. И. К вопросу о динамике поверхности жидкости при воздействии акустического радиационного давления.— Акуст. журн., 1984, т. 30, № 1, с. 1–4.
3. Варшавский Ю. И., Дадашев Р. С., Брагинская Ф. И. Применение ультразвуковой голографии в медицинской диагностике.— В кн.: Применение голографии в медицине и биологии. Л.: Наука, 1977, с. 44–59.
4. Грегуш П. Звуковидение. М.: Мир, 1982.
5. Эль-Сам Х. М. А. Прогресс в акустической голографии. В кн.: Акустическая голография. Л.: Судостроение, 1975, с. 24–38.
6. Куликовская Н. И. Влияние формы канавок на распределение интенсивности света, дифрагировавшего от решеток.— Оптико-механическая промышл., 1957, № 4, с. 22–27.
7. Ахмед М., Ван К., Мидерелл А. Голография и ее применение в акустоскопии.— ТИИЭР, 1979, т. 67, № 4, с. 25–45.
8. Ландау Л. Д., Лифшиц Е. М. Механика сплошных сред. М.: Гос. издат. техн.-теор. лит., 1954.
9. Гуцко Ю. П. Фазовая рельефография. М.: Энергия, 1974.

Институт кибернетики
Академии наук ГССР

Поступило в редакцию
12.IX.1984