АКУСТИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

Том VII 1961 Вып. 4

# ПРОСТОЙ МЕТОД ВИЗУАЛИЗАЦИИ УЛЬТРАЗВУКОВЫХ ПОЛЕЙ И ПОТОКОВ

*И. Н. Каневский*

Описывается метод визуализации ультразвуковых полей и потоков, основанный на процессе дегазации жидкости под воздействием упругих колебаний. Показано, что в ряде случаев данный метод можно применять вместо оптического метода Теплера.

Одним из факторов, предопределяющим успешное применение ультразвуковых колебаний в исследовательской работе и промышленности, является возможность их визуализации. Поэтому в настоящее время разработан целый ряд методов, позволяющих сделать ультразвуковые волны видимыми. К ним относятся [1]: метод поверхностного рельефа, термокрасок, оптический, электронно-акустический, фотодиффузионный и некоторые другие. Для реализации этих методов требуются более или менее сложные специальные устройства и приспособления. Все перечисленные методы, за исключением оптического, позволяют выявить распределение амплитуд колебаний только в плоскости, являющейся границей раздела двух сред, что может вызвать некоторые искажения исследуемого поля. Оптический метод Теплера, свободный от указанных недостатков, требует сложной и дорогостоящей аппаратуры. Кроме того, поле зрения в оптическом устройстве Теплера ограничено, и расширение его связано со значительными трудностями.

В настоящей работе описывается применение метода визуализации ультразвуковых полей, который не требует никаких специфических приспособлений и аппаратуры и обладает практически неограниченным полем зрения. Этот метод основан на процессе дегазации жидкости в ультразвуковом поле *: под действием упругих колебаний в слое жидкости выделяются растворенные газы в виде пузырьков, которые делают ультразвуковое поле видимым.

Для расшифровки структуры поля необходимо знать, в каких местах скапливается наибольшее количество видимых пузырьков газа. В работе [3] дано теоретическое исследование сил, действующих на сжимаемую сферу в звуковом поле, и установлено, что под действием сил в поле стоячих волн сфера перемещается в узел давления, если диаметр сферы больше диаметра при резонансе и в пучность давления, если диаметр меньше резонансного. Если размер сферы резонансный, то на нее силы не действуют: в этом случае сфера находится в состоянии безразличного равновесия и может свободно дрейфовать, переходя через узлы и пучности давления. Эти выводы теории подтверждены экспериментом [4].

Таким образом, для определения местоположения пузырьков в звуковом поле достаточно сравнить их диаметр с резонансным диаметром, который определяется по формуле [3]

$$d = \frac{1}{\pi f}\sqrt{\frac{3\gamma p}{\rho}}, \qquad (1)$$

* О возможности визуализации ультразвуковых полей с помощью воздушных пузырьков указывалось в литературе, например, в работе [2]. Однако этот метод практического применения пока не нашел, по-видимому, из-за недостаточной его разработки.

где $f$ — резонансная частота колебаний пузырька, $\gamma$ — отношение удельной теплоемкости газа внутри пузырька при постоянном давлении к удельной теплоемкости при постоянном объеме, $p$ — давление внутри пузырька, $\rho$ — плотность жидкости, в которой распространяется ультразвуковая волна.

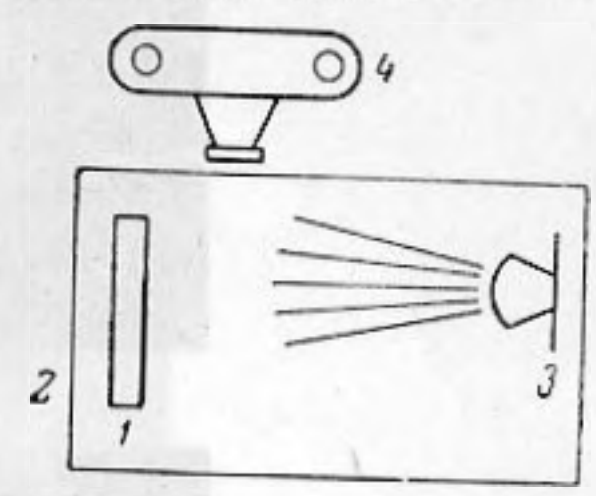
При выводе этой формулы не учитывались силы поверхностного натяжения жидкости; их учет вносит в данную формулу лишь незначительную поправку.

Для случая визуализации ультразвукового поля в воде при помощи пузырьков воздуха $\gamma = 1{,}14$, $\rho = 1$. При обычных условиях давление $p$ практически равно атмосферному: $p = 1{,}02 \cdot 10^6$ *дин/см*$^2$. Тогда из формулы (1) следует

$$d = 6{,}57/f\ , \tag{2}$$

где $d$ — диаметр сферы в миллиметрах, $f$ — частота в килогерцах.

Из формулы (2) следует, что на частоте 1 *мггц* дорезонансные пузырьки воздуха в воде имеют диаметр, меньший 0,007 *мм*. Поэтому при частотах порядка 1 *мггц*, на которых нами велись наблюдения, наиболее заметны пузырьки с диаметром, большим резонансного. Как уже указывалось выше, эти пузырьки должны располагаться в узлах давления.



Фиг. 1

Если волна является чисто бегущей, то ее невозможно визуализировать методом воздушных пузырьков, так как пузырьки будут непрерывно перемещаться в акустическом поле. Однако на практике, когда измерения производятся в сосудах ограниченных размеров, даже при наличии звукопоглощающих покрытий всегда имеет место отражение волн. В результате суперпозиции отраженных волн с основным полем образуется своеобразный «растр», состоящий из небольших максимумов и минимумов давления, практически не искажающих основного поля. В минимумах давления скапливаются воздушные пузырьки, которые остаются неподвижными даже при небольших коэффициентах стоячести, что позволяет визуализировать ультразвуковое поле. «Контрастность» изображения можно регулировать, изменяя коэффициент стоячести при помощи полупроницаемых (для ультразвука) экранов, помещенных в ультразвуковое поле.

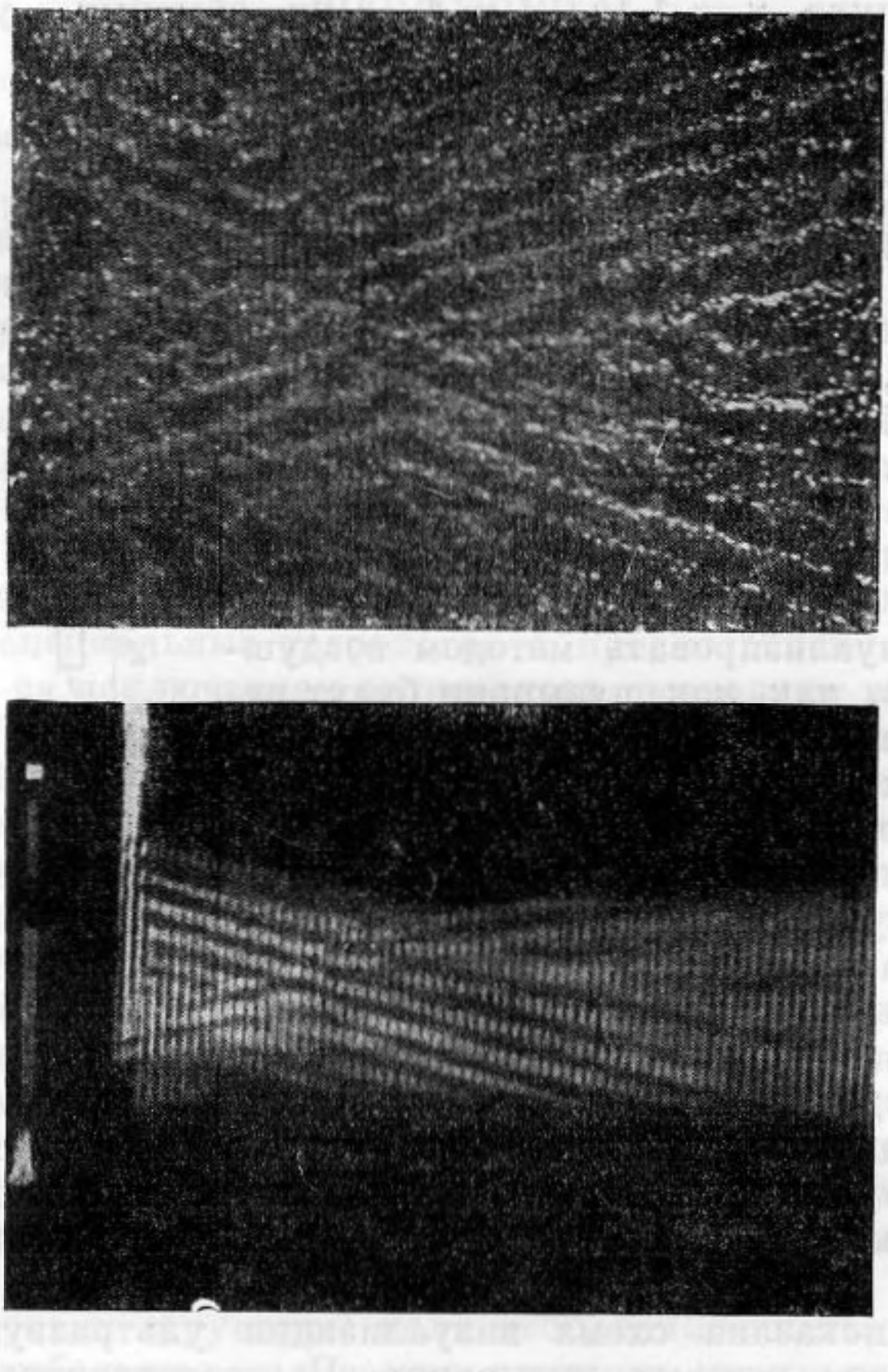
На фиг. 1 показана схема визуализации ультразвукового поля в жидкости методом газовых пузырьков. Пьезоэлектрический преобразователь *1* работает в сосуде с жидкостью *2*, в который помещен подводный осветитель *3*. Для уменьшения коэффициента стоячести дно и стены сосуда обклеены резиной; кроме того, перед ними помещены пластины, сделанные из той же резины и стоящие под углом к направлению падения волны. Попадая на пластины, ультразвуковая волна испытывает многократные отражения и в результате поглощения в резине значительно ослабляется. Картина поля в сосуде видна невооруженным глазом; при желании ее можно фиксировать при помощи фотоаппарата *4*.

Для получения четкого и контрастного изображения поля необходимо правильно расположить осветитель относительно ультразвукового пучка и обеспечить поглощение света, рассеянного в сосуде. Экспериментально установлено, что наилучшие результаты получаются, когда оптическая ось фотоаппарата ортогональна как к ультразвуковому, так и к световому пучкам. Поглотителями рассеянного света являются звукопоглощающие жалюзи, изготовленные из черной резины.

При фотографировании ультразвуковых пучков большой ширины для получения более равномерной освещенности поля применяются несколько осветителей. В наших опытах использовались низковольтные лампы

мощностью 30 *вт* в количестве до четырех штук. В зависимости от интенсивности ультразвукового поля и содержания газа в воде время экспозиции при фотографировании колебалось от 0,1 до 1 *сек*. Интенсивность ультразвукового поля изменялась от 0,5 до 3 *вт/см*$^2$ при работе плоского излучателя и от 0,5 до 20 *вт/см*$^2$ в фокусе цилиндрического излучателя.

На фиг. 2, *а* показано ультразвуковое поле плоского прямоугольного излучателя из керамики титаната бария, работающего на частоте 830 *кгц*.

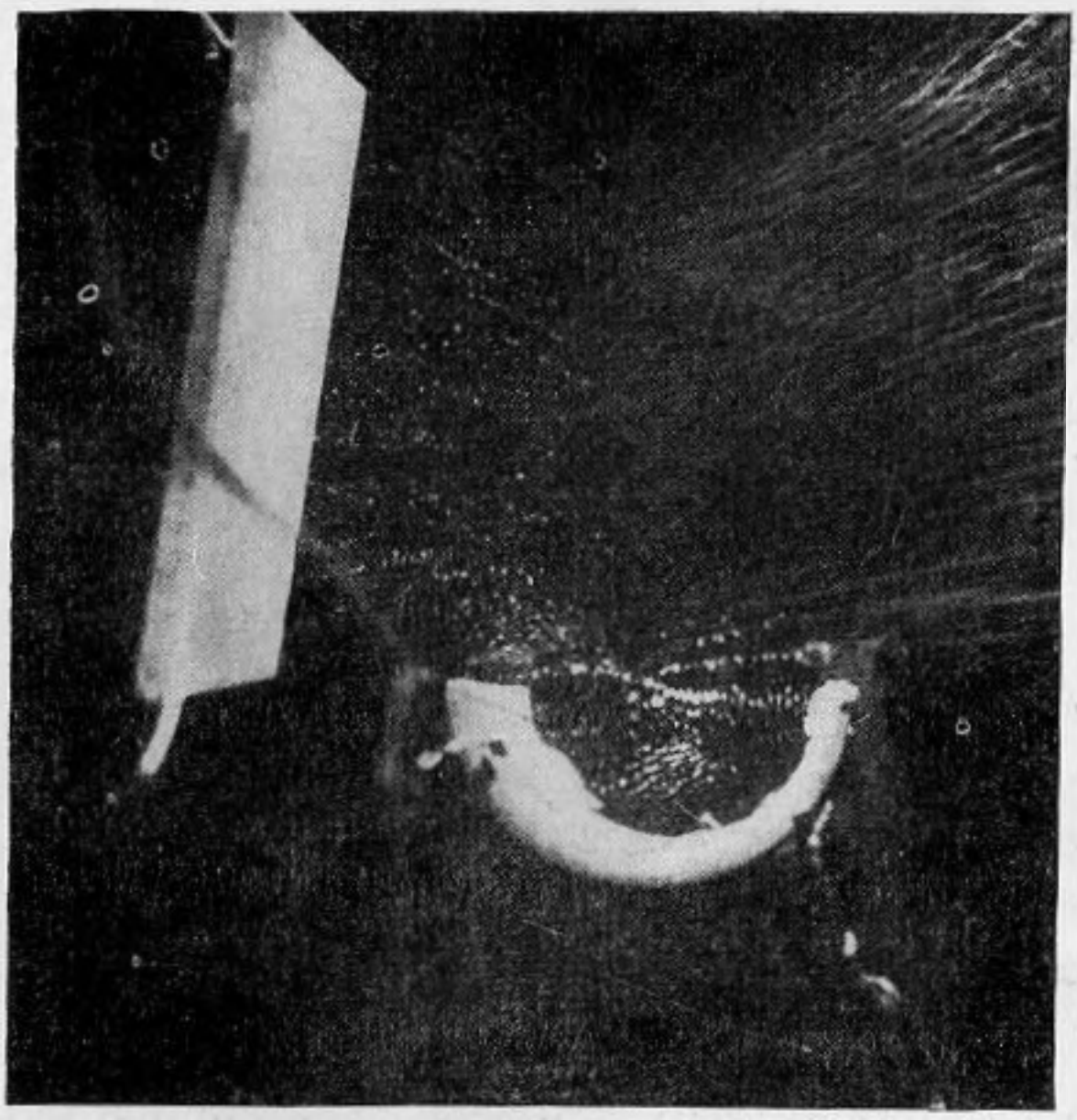


Фиг. 2

Поле визуализировано методом воздушных пузырьков в обыкновенной водопроводной воде. На фиг. 2, *б* показано поле кварцевого излучателя, работающего в вазелиновом масле на частоте 1,26 *мггц*. Эта фотография получена в работе [5] методом Теплера.

Фотографии на фиг. 2, полученные разными методами, состоят из чередующихся светлых и темных пятен. Это связано с тем, что оба метода визуализации реагируют на изменение избыточного давления, причем на фиг. 2, *а* светлые пятна образуются в результате рассеяния света на пузырьках воздуха, расположенных в узлах давления, а на фиг. 2, *б* — в результате дифракции световых волн в пучностях давления. Таким образом, если одну из фотографий принять за позитивное изображение поля, то другую следует считать негативным изображением. Однако это различие не является принципиальным, так как достаточно в установке Теплера нож, закрывающий спектр нулевого порядка, заменить отверстием в экране, закрывающим спектры высших порядков, как картина фиг. 2, *б* изменится на обратную: темные места станут светлыми, а свет-

лые — темными. В этом случае между обеими фотографиями фиг. 2 будет полное соответствие. Следовательно, оба метода визуализации ультразвукового поля адекватны друг другу. На фиг. 2 обращает на себя внимание также следующая закономерность. На обеих фотографиях видны чередующиеся светлые и темные параллельные полосы, направленные под углом к поверхности преобразователя. Эта особенность поля связана со



Фиг. 3

спецификой колебаний пьезоэлектрических излучателей и находит свое объяснение в работе [6].

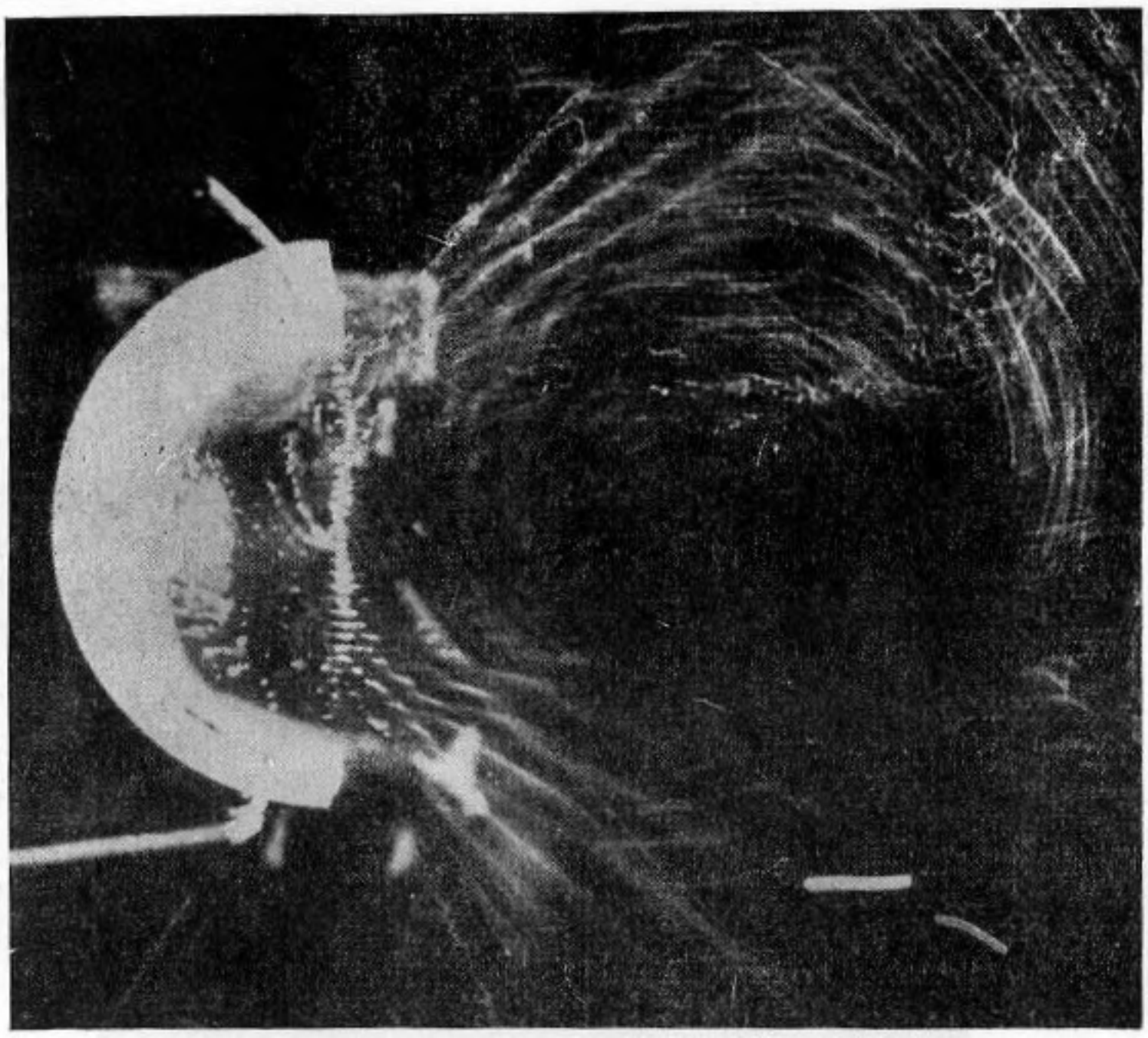
На фиг. 3 дан еще один пример визуализации ультразвукового поля методом воздушных пузырьков. На фотографии виден результат суперпозиции полей плоского и фокусирующего цилиндрического преобразователей, работающих на одной и той же частоте 830 *кгц*.

Метод воздушных пузырьков может с успехом применяться для визуализации так называемого ультразвукового ветра — постоянных потоков жидкости, возникающих в ультразвуковом поле. Для получения четкой картины потоков достаточно произвести фотографирование поля на установке фиг. 1, увеличив время экспозиции до 3—5 *сек*. Потоки становятся видимыми в результате перемещения газовых пузырьков, появившихся в жидкости при ее дегазации в ультразвуковом поле. Наилучшие результаты получаются при фотографировании постоянных потоков в водопроводной воде непосредственно после наполнения сосуда, когда количество воздушных пузырьков в жидкости особенно велико.

Например, на фиг. 3 в правом верхнем углу, видны светлые полосы, возникшие в результате перемещения воздушных пузырьков в потоке жидкости. Как видно из фотографии, пузырьки перемещались по определенным трассам, лежащим вдоль линий минимального давления. При бóльших интенсивностях или бóльших экспозициях трассы пузырьков слились бы и на фотографии остался бы сплошной след постоянного потока.

На фиг. 4 показана картина вихревого движения воды, возникающего в поле сходящегося цилиндрического фронта, образованного фокусирующим пьезоэлектрическим излучателем из титаната бария. Частота колебаний преобразователя — 850 *кгц*, интенсивность — порядка 3 *вт/см*$^2$-

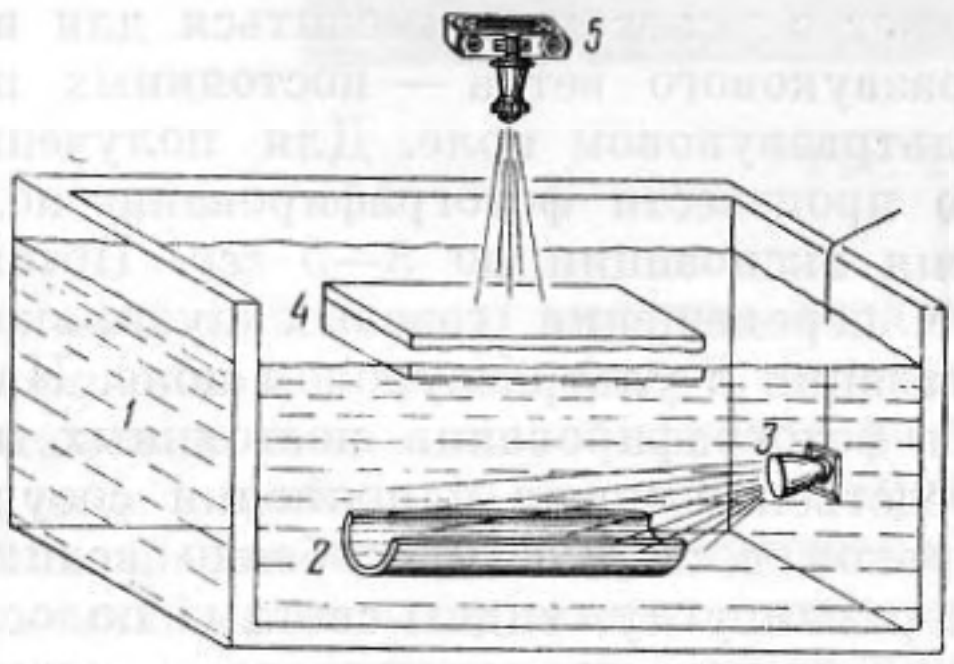
Рассматриваемый метод может быть использован также для наблюдения поля вблизи самой поверхности излучателя. Для этого в установку вносятся небольшие изменения, соответственно фиг. 5. Здесь *1* — наполненный водой сосуд, в котором расположены пьезоэлектрический излучатель *2* и подводный осветитель *3*. На поверхности жидкости для



Фиг. 4

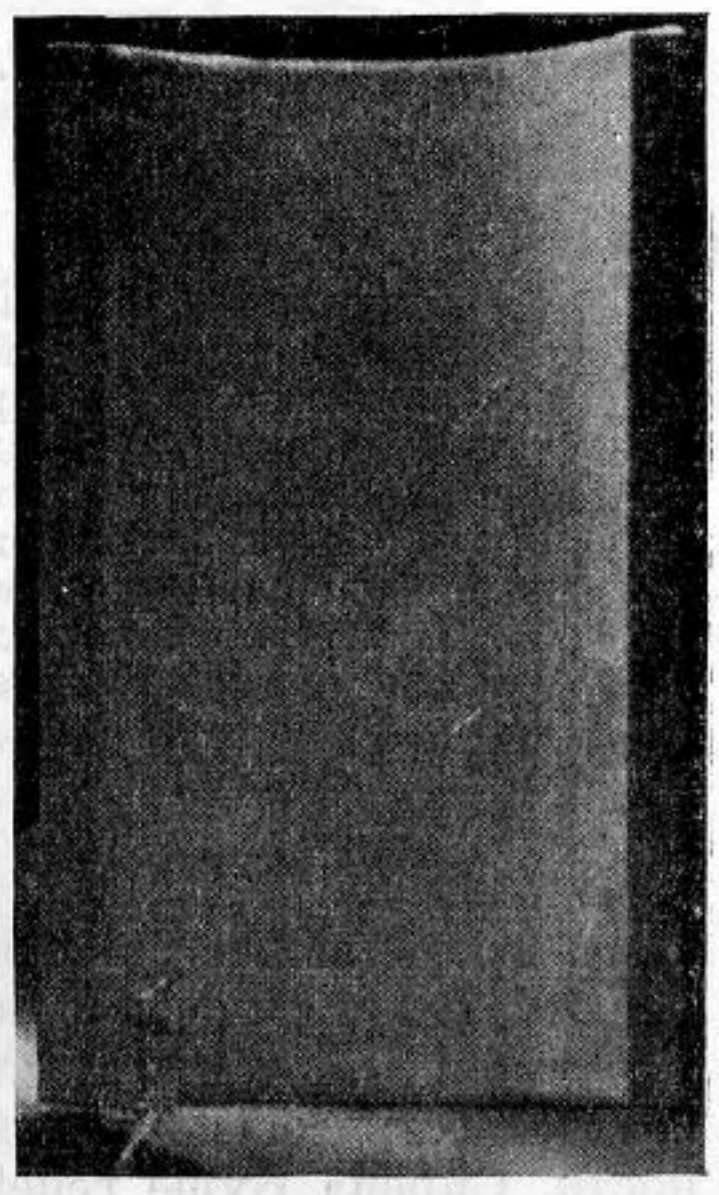
предотвращения образования ряби помещено стекло *4*. Картина поля у поверхности излучателя может наблюдаться невооруженным глазом или фотографироваться аппаратом *5*.

На фиг. 6 приведена фотография поля у поверхности цилиндрического преобразователя. Видны чередующиеся светлые и темные полосы, направленные вдоль образующей цилиндра и связанные с периодическим распределением амплитуды колебаний по поверхности преобразователя [7]. Возникновение полос объясняется следующим образом. Мелкие дорезонансные пузырьки воздуха, возникающие в результате дегазации воды, скапливаются в пучностях давления и рассеивают свет, падающий под малым углом к поверхности излучателя. Вследствие этого на освещенной поверхности излучателя возникает тень в виде темных полос. Следует отметить, что отдельные газовые пузырьки столь малы, что не различимы невооруженным глазом. Устойчивая картина поля вблизи поверхности преобразователя наблюдается только при сравнительно малых интенсивностях — порядка десятых долей *вт/см*$^2$.




Фиг. 5

Интересно отметить инерционность наблюдавшегося оптикоакустического эффекта: чередующиеся светлые и темные полосы после выключения ультразвука исчезают не сразу, а постепенно, в течение 1—2 *сек*. Похожую инерционность наблюдали Поррека и Коррелли [8] в опытах по дифракции света на ультразвуковых волнах, распространяющихся в некоторых коллоидных растворах и растворах неорганических солей. Исследования этих авторов показали, что в чистых жидкостях, в частности, в воде, инерционность не наблюдается — оптические спектры исчезают одновременно с выключением ультразвука. В наших опытах инерционность объясняется тем, что визуализация периодической структуры фактически осуществляется облачком воздушных пузырьков, которое постепенно «рассасывается» после прекращения действия ультразвукового излучателя.



Фиг. 6

Сравним, наконец, метод Теплера с методом воздушных пузырьков. Метод Теплера позволяет визуализировать поля как стоячих волн, так и бегущих (при стробоскопическом освещении). К достоинствам метода Теплера следует также отнести его высокую чувствительность и большую разрешающую способность. Недостатками являются сложность настройки, ограниченное поле зрения и громоздкость установки.

Основные достоинства метода газовых пузырьков состоят в чрезвычайной простоте и практически неограниченном поле зрения. Кроме того, данный метод позволяет легко производить послойную визуализацию ультразвукового поля в толще жидкости. Главными недостатками этого метода являются невозможность визуализации чисто бегущих волн и низкая чувствительность: метод газовых пузырьков пригоден только для визуализации полей сравнительно больших интенсивностей (порядка 0,5 *вт/см*$^2$). Следует отметить, что, применяя искусственное насыщение жидкости газом, можно повысить чувствительность данного метода, однако в этом случае он лишится одного из своих основных преимуществ — простоты.

Пользуюсь случаем выразить благодарность Л. Д. Розенбергу за важные критические замечания и внимание к данной работе.

ЛИТЕРАТУРА

1. Л. Д. Розенберг. Обзор методов визуализации ультразвуковых полей. Акуст. ж., 1955, 1, 2, 99—109.
2. Л. Бергман. Ультразвук и его применение в науке и технике. М., ИЛ, 1956.
3. K. Yosioka, G. Kawasima. Acoustic radiation pressure on a compressible sphere. Acustica, 1955, 5, 3, 167—173.
4. K. Yosioka, G. Kawasima, H. Hirano. Acoustic radiation pressure on bubbles and their logarithmic decrement. Acustica, 1955, 5, 3, 173—178.
5. С. Н. Ржевкин. К вопросу о волновом поле пьезокварцевого излучателя. Докл. АН СССР, 1937, 16, 5, 275—278.
6. И. Н. Каневский. Экспериментальное исследование цилиндрических фокусирующих систем. Акуст. ж., 1960, 5, 1, 123—124.
7. И. Н. Каневский. Об анализе искажений поля плоского пьезоэлектрического излучателя. Докл. АН СССР, 1959, 129, 4, 766—768.
8. A. Carrelli, F. Porreca. Ultrasonic grating after stopping the supersonic waves. Nuovo Cimento, 1953, 10, 1, 98—102.

Акустический институт АН СССР
Москва

Поступила в редакцию
14 марта 1961 г.