

УДК 534.229

АНАЛИЗ ИЗОБРАЖЕНИЙ УЛЬТРАЗВУКОВОГО ПОЛЯ, ПОЛУЧЕННЫХ В ВОЗДУХЕ С ПОМОЩЬЮ ЖИДКОКРИСТАЛЛИЧЕСКОЙ ПЛЕНКИ

Легуша Ф. Ф., Мурга В. А., Славин А. Н.

Приведены результаты теоретического и экспериментального исследования ультразвукового поля в воздушном промежутке между двумя плоскостями, в одну из которых помещен круглый излучатель. Поле визуализировалось посредством пленки холестерических жидких кристаллов.

Визуализация ультразвуковых полей при помощи жидкокристаллической пленки холестерического типа возможна потому, что в результате поглощения ультразвука в среде, заполняющей область, непосредственно прилегающую к поверхности жидкокристаллической пленки, на этой поверхности возникает распределение температур, а жидкокристаллическая пленка при изменении температуры меняет цвет от красного до фиолетового. В настоящее время накоплен опыт по использованию жидкокристаллической пленки для визуализации ультразвуковых полей в твердом теле (Al_2O_3) [1], в жидкости (H_2O) [2, 3] и в газе (воздух) [4, 5], однако вопрос о том, при каких условиях и в каких средах детекторы на основе жидкокристаллической пленки являются адекватными визуализаторами ультразвука, по-прежнему остается открытым.

В работе [2] утверждается, что изображения, полученные при визуализации поля источника ультразвука, расположенного в воде, находятся в качественном соответствии с распределениями звукового давления в свободном поле того же источника ультразвука, теоретически рассчитанными в работе [6].

В газе, где жидкокристаллическая пленка представляет собой поверхность, сильно отражающую ультразвук, ситуация существенно изменяется. Опыты работы [4] показали, что при исследовании сравнительно высокочастотных ультразвуковых полей ($f=992$ кГц) изображение, возникающее на жидкокристаллической пленке, помещенной в воздухе на расстоянии $z=2$ мм от излучающей поверхности источника ультразвука, повторяет распределение амплитуд колебаний излучающей поверхности. Эксперименты работы [5] по визуализации в воздухе ультразвуковых полей частоты 50 кГц при $z=0,5-15$ мм продемонстрировали отсутствие прямого соответствия наблюдаемого на жидкокристаллической пленке изображения как распределению амплитуд колебаний поверхности источника, так и распределению звукового давления в свободном поле этого источника на данном расстоянии от его поверхности.

Представляется интересным теоретически рассмотреть (хотя бы качественно) процесс нагревания жидкокристаллической пленки ультразвуком и сравнить полученные результаты с экспериментальными данными. Если считать жидкокристаллическую пленку абсолютно теплопроводящей твердой стенкой, то среднюю плотность потока тепла можно рассчитать с помощью формулы [7]:

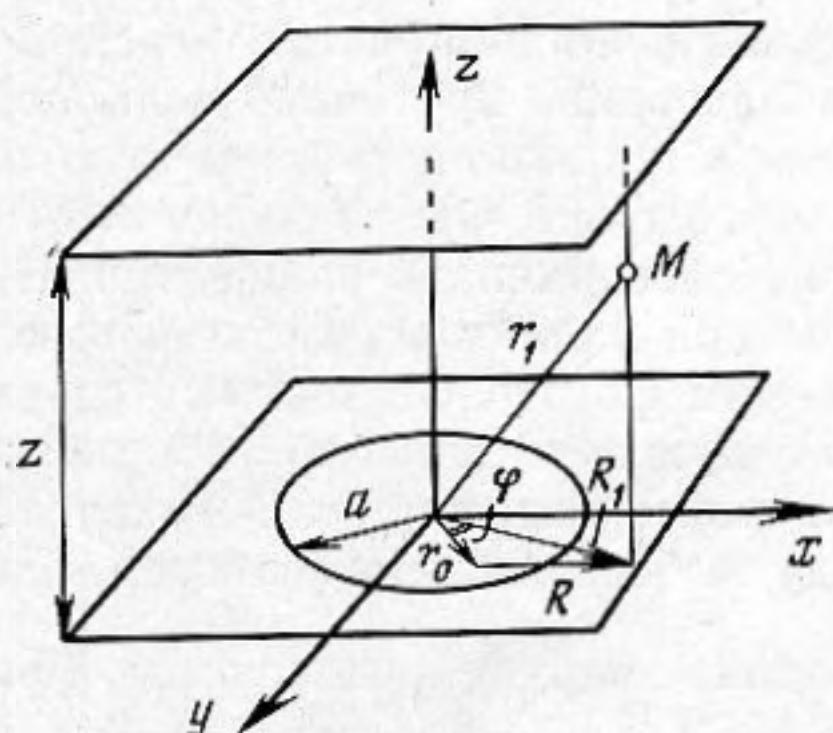
$$\bar{E}_{\text{мех}} = \frac{A^2 c^2 \sqrt{2\omega}}{\rho} \left[V_{\chi} \left(\frac{c_P}{c_V} - 1 \right) + \sin^2 \theta \sqrt{\bar{v}} \right], \quad (1)$$

где $\bar{E}_{\text{мех}}$ — средняя плотность потока тепла, A — амплитуда колебаний плотности газа в звуковой волне, c — скорость звука, ω — угловая частота,

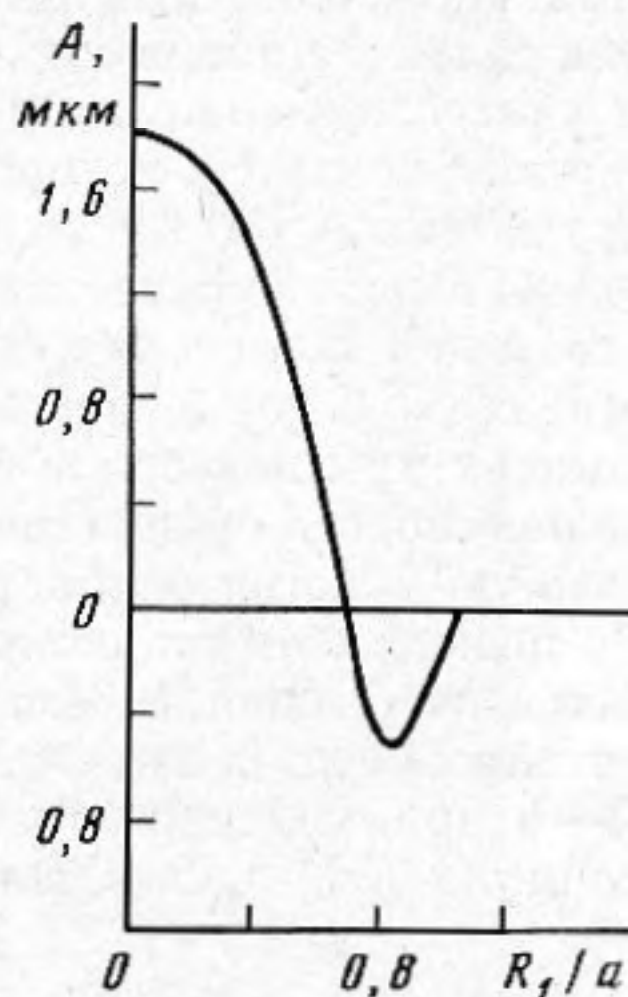
ρ — плотность невозмущенного газа, χ — температуропроводность, ν — кинематическая вязкость, c_p и c_v — удельные теплоемкости при постоянных давлении и объеме соответственно, θ — угол падения плоской волны на стенку. Пренебрегая в (1) вторым слагаемым и выражая амплитуду плотности A через амплитуду потенциала $\hat{\Phi}$, получаем

$$\bar{E}_{\text{мех}} = \frac{\rho k^2}{2 \sqrt{2}} V \chi \omega |\hat{\Phi}|^2 \left(\frac{c_p}{c_v} - 1 \right), \quad (2)$$

где $k = \omega/c$. Написанное выражение справедливо не только для плоской волны, но и для любого волнового движения. В последнем случае амплитуда потенциала имеет смысл местной амплитуды вблизи стенки. Кроме того, источник ультразвука должен работать в «высокочастотном» режиме, т. е. большая часть энергии должна излучаться в нормальном к поверх-



Фиг. 1



Фиг. 2

Фиг. 1. Система координат для решения задачи об определении потенциала скорости $\hat{\Phi}$ в пространстве между двумя параллельными отражающими пластинами

Фиг. 2. Распределение амплитуд колебаний поверхности исследуемого пьезоэлемента вдоль его радиуса

ности источника направления. В этом случае, как видно из (2), локальная плотность энергии, поглощаемой стенкой, пропорциональна квадрату амплитуды потенциала. Поэтому естественно ожидать качественного соответствия распределения модуля потенциала $\hat{\Phi}$ вдоль поверхности стенки с распределением температуры.

Таким образом, задача сводится к определению потенциала скорости $\hat{\Phi}$ в пространстве между двумя параллельными пластинами вблизи верхней из них (фиг. 1). В нижней пластине находится источник ультразвука в виде диска (радиуса a), колеблющийся по гармоническому закону с аксиальной симметрией и известным распределением колебаний по поверхности излучателя. Пластины считаются абсолютно жесткими. Задача решается в акустическом приближении. Решение данной задачи записывается в виде [8]

$$\hat{\Phi}(r_1) = \frac{i}{4z} \sum_{N=0}^{\infty} \varepsilon_N \cos \frac{\pi N z_1}{z} \int_0^a \int_0^{2\pi} \hat{v}_n(r_0) H_0^{(1)}(k_N R) r_0 dr_0 d\varphi. \quad (3)$$

Здесь шляпки над буквами обозначают комплексные амплитуды; \hat{v}_n — нормальная скорость точки поверхности источника ультразвука; R , r_0 и R_1 (фиг. 1) связаны соотношением $R^2 = r_0^2 + R_1^2 - 2r_0 R_1 \cos \varphi$; φ — азимуталь-

ный угол в цилиндрической системе координат r_0, z_1, φ ; $R = \sqrt{(x_1 - x_0)^2 + (y_1 - y_0)^2}$; $\varepsilon_N = \begin{cases} 1 & \text{при } N=0, \\ 2 & \text{при } N>0, \end{cases} \quad H_0^{(1)}$ — функция Ханкеля

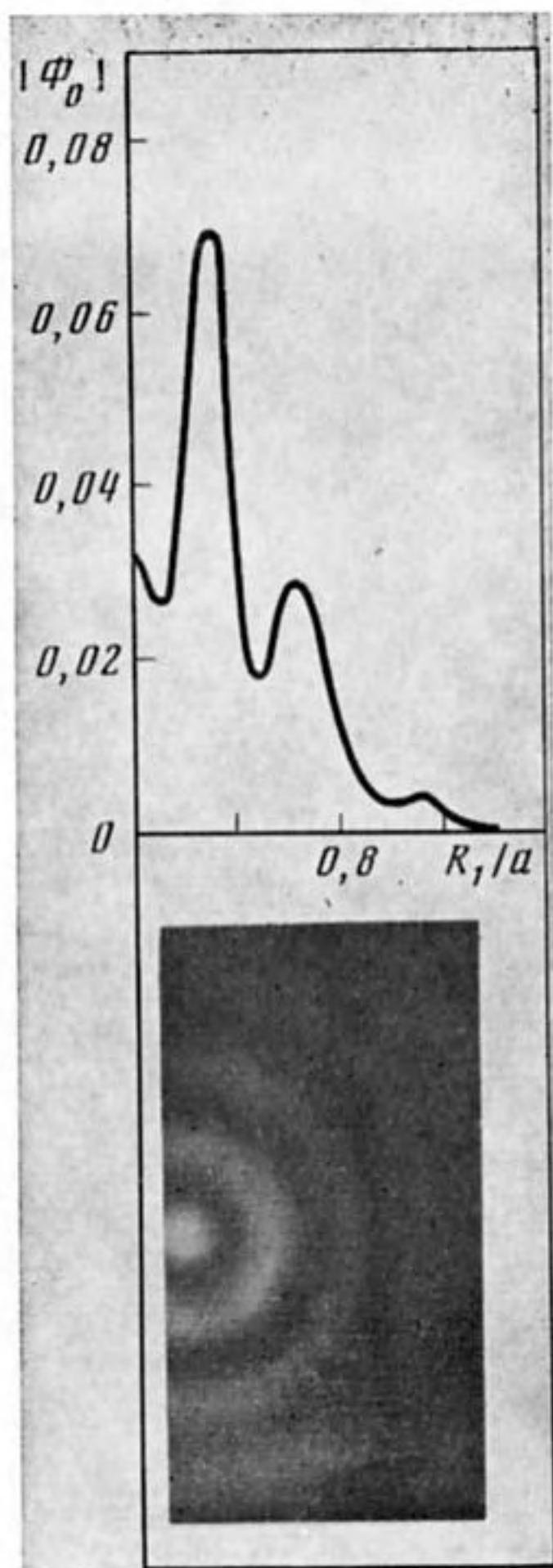
первого рода с нулевым индексом, $k_N = k\sqrt{1 - (\pi N/kr)^2}$, i — мнимая единица. Расчет по формуле (3) проводился с помощью ЭВМ.

В экспериментах настоящей работы источником ультразвука служил цилиндрический пьезоэлемент радиусом $a=12,5$ мм, свободно лежавший в цилиндрическом углублении в плоском жестком экране. Торцевая колеблющаяся поверхность пьезоэлемента была расположена вровень с экраном, а зазор между боковой поверхностью пьезоэлемента и экраном не превышал $0,05\lambda$, где λ — длина волны ультразвука в воздухе. Распределение амплитуд $A(R_1/a)$ колебаний поверхности пьезоэлемента, определенное голографическим методом, приведено на фиг. 2. Возбуждение пьезоэлемента осуществлялось на частоте $f=49,4$ кГц ($\lambda=6,8$ мм) электрическим сигналом с напряжением $U=60$ В. В воздухе на высоте z над источником ультразвука параллельно его излучающей поверхности помещался плоский визуализатор, который представлял собой жидкокристаллическую пленку толщиной 150 мкм, наклеенную снизу на светопрозрачную кювету с проточной водой фиксированной температуры. Температурный интервал существования холестерической мезофазы в жидкокристаллической пленке составлял 5°C (от 25 до 30°C). Использование проточной воды постоянной температуры позволяло поддерживать жидкокристаллическую пленку на нижнем пороге существования мезофазы (25°C), создавая тем самым наибольшую чувствительность, а также обеспечивать равномерный отбор тепла с поверхности жидкокристаллической пленки и стабилизацию получающихся изображений. Эти изображения фотографировались сверху через светопрозрачную кювету на черно-белую или цветную фотопленку. На фиг. 3—5 приведены результаты сравнения теоретически рассчитанных (по формуле (3)) распределений модуля безразмерного потенциала скорости $|\hat{\Phi}_0(R_1/a)| = |4z\hat{\Phi}/(a^2v_n^2)|$ вдоль верхней пластины (фиг. 1)

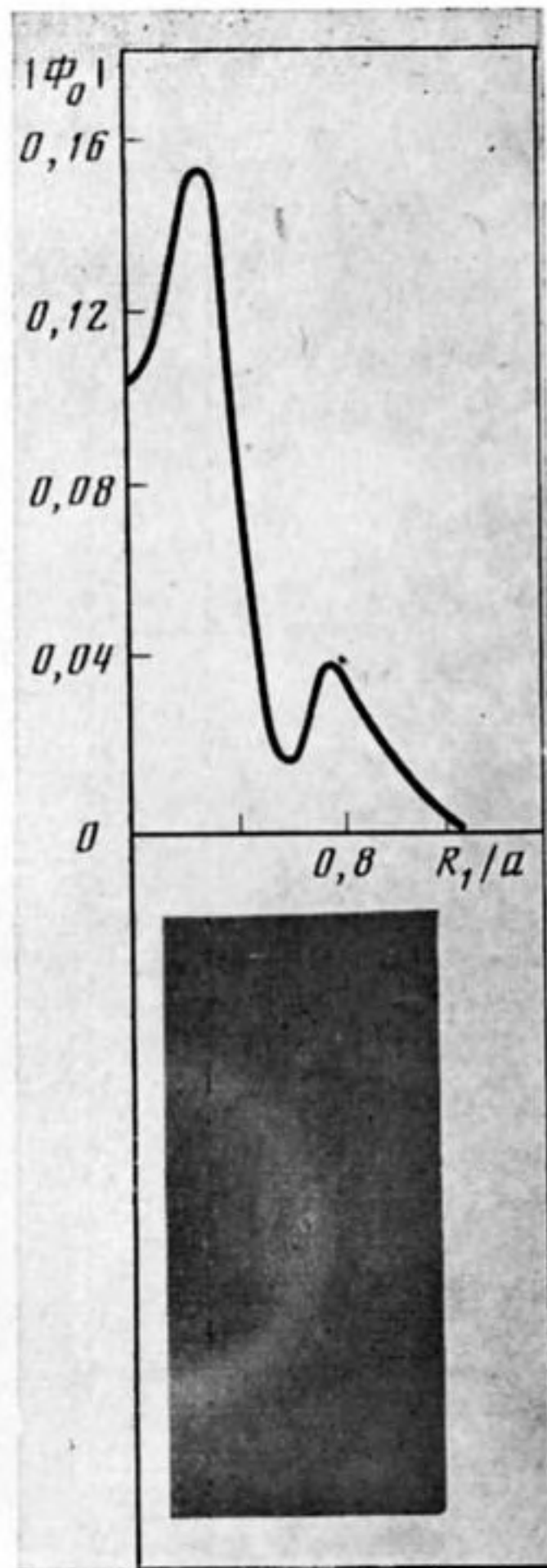
с изображениями на жидкокристаллической пленке, полученными при разных расстояниях z между пьезоэлементом и жидкокристаллической пленкой ($z=2,0; 3,0; 4,0$ мм соответственно). Светлые области на фотографиях соответствуют большей температуре жидкокристаллической пленки, а следовательно, большей интенсивности ультразвука. Видно, что при $z < \lambda/2$ (фиг. 3, 4) имеет место хорошее качественное соответствие результатов расчета и эксперимента. При значении $z=4,0$ мм ($z > \lambda/2$) в эксперименте в центре изображения наблюдается минимум интенсивности ультразвука, не предсказываемый теорией (фиг. 5). При больших z наблюдаемые на жидкокристаллической пленке изображения сильно изменяются с ростом z и не соответствуют результатам теоретического расчета по формуле (3). Такое несоответствие обусловлено, по-видимому, тем, что при расстояниях жидкокристаллической пленки от источника ультразвука, равных или больших $\lambda/2$, начинает сказываться обратное влияние колеблющейся среды на источник, так что форма колеблющейся поверхности источника становится не такой, как на фиг. 2, где показано распределение колебаний, полученное в отсутствие жесткой стенки над источником ультразвука.

Таким образом, в настоящей работе показано, что изображение, которое возникает на жидкокристаллической пленке, находящейся в воздухе вблизи (при $z < \lambda/2$) источника ультразвука, качественно соответствует распределению модуля потенциала скорости вдоль жесткой стенки, расположенной в том месте, где находится жидкокристаллическая пленка.

Авторы выражают благодарность О. А. Капустиной за ценные обсуждения и внимание к работе.



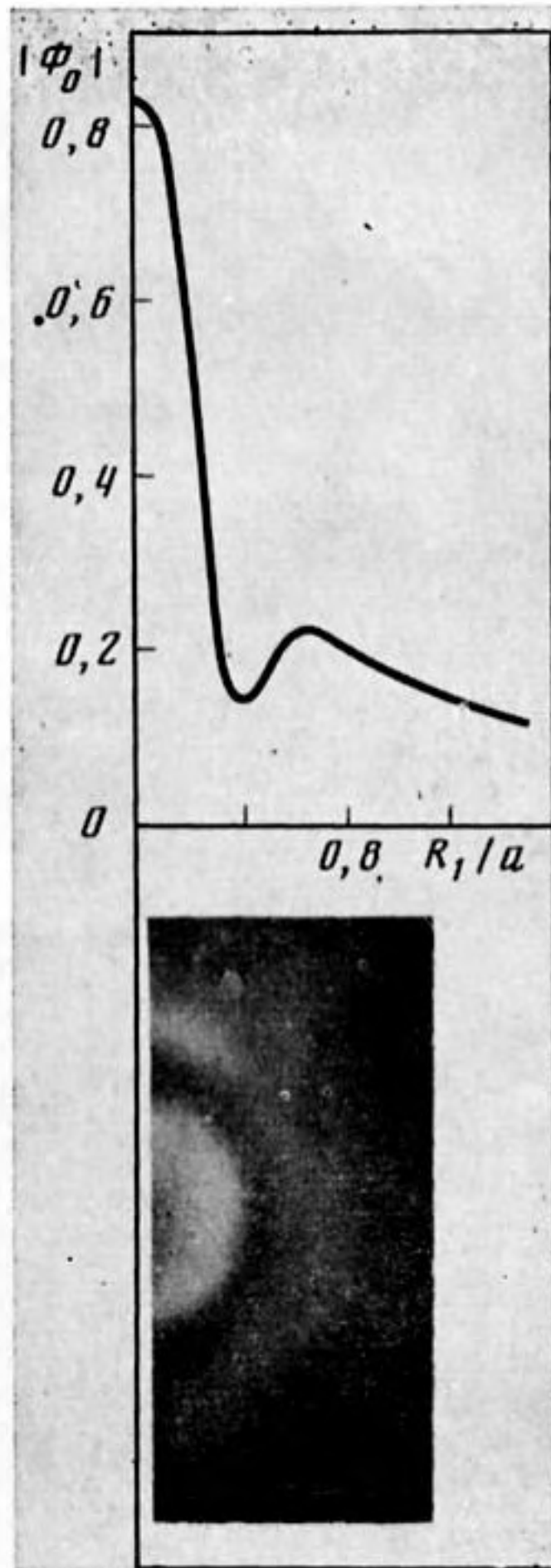
Фиг. 3



Фиг. 4

Фиг. 3. Распределение модуля безразмерного потенциала скорости $|\hat{\Phi}_0|$ вдоль верхней отражающей пластины, теоретически рассчитанное по формуле (3), и изображение, наблюдаемое на жидкокристаллической пленке, наклеенной на эту пластину при $z=2$ мм

Фиг. 4. См. подпись к фиг. 3, при $z=3$



Фиг. 5. См. подпись к фиг. 3, при $z=4$

ЛИТЕРАТУРА

1. *Havlice J. F.* Visualization of acoustic beams using liquid crystals.— *Electronics letters*, 1969, N 20, p. 477—478.
2. *Cook B. E., Werchan R. E.* Mapping ultrasonic fields with cholesteric liquid crystals.— *Ultrasonics*, 1971, v. 9, N 2, p. 101—103.
3. *Denis R.* Characterization of ultrasonic transducers using cholesteric liquid crystals.— *Ultrasonics*, 1978, v. 16, N 1, p. 37—42.
4. *Легуша Ф. Ф., Прохорова Е. В., Тищенко В. Г., Финагин Б. А., Фирсов Е. И.* Визуализация колебаний поверхности пьезопреобразователей при помощи жидких кристаллов.— *Тр. Ленинградск. кораблестроительного ин-та*, 1976, вып. 103, с. 74—76.
5. *Ганичев Г. М., Легуша Ф. Ф., Славин А. Н., Финагин Б. А., Хаустов В. Г.* Применение жидкокристаллических пленок для визуализации ультразвука в воздухе.— *Акуст. ж.*, 1979, т. 25, № 2, с. 619—622.
6. *Freedman A.* Sound field of a rectangular piston.— *J. Acoust. Soc. Amer.*, 1960, v. 32, N 2, p. 130—136.
7. *Ландау Л. Д., Лифшиц Е. М.* *Механика сплошных сред*. М.: ГИТТЛ, 1954.
8. *Шендеров Е. Л.* *Волновые задачи гидроакустики*. Л.: Судостроение, 1972.

Ленинградский
кораблестроительный
институт

Поступила в редакцию
18.XI.1981