Declassified in Part - Sanitized Copy Approved for Release 2013/04/15 : CIA-RDP80T00246A019600290001-3
50X1-HUM

Page Denied

Next 2 Page(s) In Document Denied

Declassified in Part - Sanitized Copy Approved for Release 2013/04/15 : CIA-RDP80T00246A019600290001-3

Declassified in Part - Sanitized Copy Approved for Release 2013/04/15 : CIA-RDP80T00246A019600290001-3

АКАДЕМИЯ НАУК СССР

STAT

АКУСТИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

ТОМ VIII

Выпуск 1

(ОТДЕЛЬНЫЙ ОТТИСК)

МОСКВА · 1962

Declassified in Part - Sanitized Copy Approved for Release 2013/04/15 : CIA-RDP80T00246A019600290001-3

Declassified in Part - Sanitized Copy Approved for Release 2013/04/15 : CIA-RDP80T00246A019600290001-3

АКУСТИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

Том VIII 1962 Вып. 1

ФОКУСИРУЮЩИЙ КОНЦЕНТРАТОР УЛЬТРАЗВУКА ИЗ ТВЕРДОГО МАТЕРИАЛА

М. Г. Сиротюк

Показана возможность использования твердого тела в качестве фокусирующего устройства с последующей передачей сфокусированного звука в жидкость, что в некоторых случаях может быть более выгодным, чем использование для фокусирования самой исследуемой жидкости.

Для получения больших звуковых давлений применяются различные типы концентраторов: вогнутые излучатели, линзы, зеркала и так далее. Все эти известные фокусирующие устройства создают сходящийся фронт волны в жидкости. В области фокального пятна такого концентратора легко можно получить давления, вызывающие кавитацию жидкости. Однако по мере увеличения интенсивности звука кавитация начинает образовываться уже до фокального пятна, поэтому рост звукового давления в самом фокальном пятне замедляется.

Кроме того, при большой интенсивности фокусируемого звука в жидкости начинают сказываться нелинейные эффекты искажения формы волны. Распространяясь в жидкости, синусоидальная волна постепенно превращается в волну пилообразной формы, энергия перекачивается из основной в высшие гармоники, в результате чего растет нелинейное поглощение в жидкости. Это явление также ограничивает рост звукового давления в фокальном пятне.

Если создать сходящийся фронт волны в твердом материале и вывести звуковую энергию в жидкость, когда амплитуда колебаний уже достигла необходимого значения, можно значительно уменьшить указанные трудности.

Нами была сделана попытка получить сходящийся фронт волны в некоторых твердых телах, например, в алюминиевой полусфере, на внешней стороне которой были сделаны плоские площадки для приклейки пьезоэлектрической мозаики, в системе в виде параболоида вращения и других. Однако в этих концентраторах, кроме волн необходимого типа, присутствовало много различных видов колебаний, в связи с чем они обладали небольшим к. п. д.

Для создания симметричного сходящегося фронта Исакович [1] предложил использовать твердый шар, в центре которого находится полость, заполняемая исследуемой жидкостью.

Если поверхность такого шара синфазно возбуждать, например, пьезоэлектрической мозаикой, то можно получить в чистом виде радиально симметричные колебания. Если в предположении бегущей волны усиление сферического концентрата было бы $2\,kb$ (где k — волновое число, b — радиус шара), то, возбуждая сферу на резонансных частотах ее радиальных колебаний, можно получить дополнительный резонансный выигрыш. Величина его определяется потерями в материале сферы. Если настроить также в резонанс и внутреннюю полость, то получится еще один резонансный выигрыш, величина которого определяется потерями в жидкости, заполняющей полость. При этом наибольшая амплитуда смещения стенок полости (и соответственно к. п. д.) будет при совпадании резонансов радиальных колебаний сферы и полости.

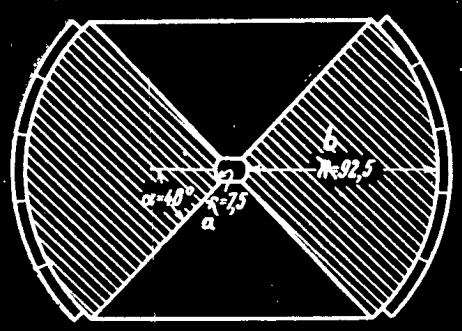
Declassified in Part - Sanitized Copy Approved for Release 2013/04/15 : CIA-RDP80T00246A019600290001-3

Declassified in Part - Sanitized Copy Approved for Release 2013/04/15 : CIA-RDP80T00246A019600290001-3

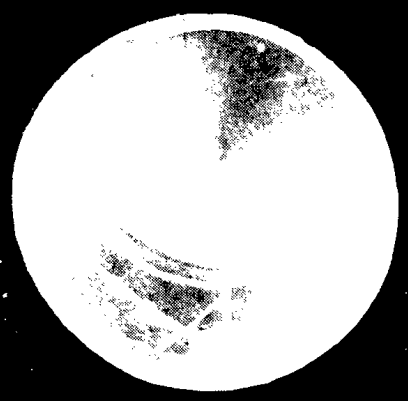
Для того чтобы максимальное давление было в центре полости, а на ее границе был узел давлений (при этом возникновение кавитации на границе жидкость — твердое тело будет затруднено), диаметр полости должен быть равен целому нечетному числу полуволн. Однако из-за потерь в жидкости, заполняющей полость (потерями в металле сферы можно пренебречь), в концентраторе, наряду со стоячей, будет существовать и бегущая волна, несущая энергию от генератора.

Коэффициент усиления такого концентратора, как это показано в работе [1], равен $K = b/a\varepsilon$, где b и a — радиусы сферы и полости, соответственно; ε — тангенс угла потерь в жидкости.

Для проверки этих соображений нами был испытан концентратор, выполненный из алюминиевой сферы радиусом 100 *мм*. В ее центре была сде-



Фиг. 1



Фиг. 2

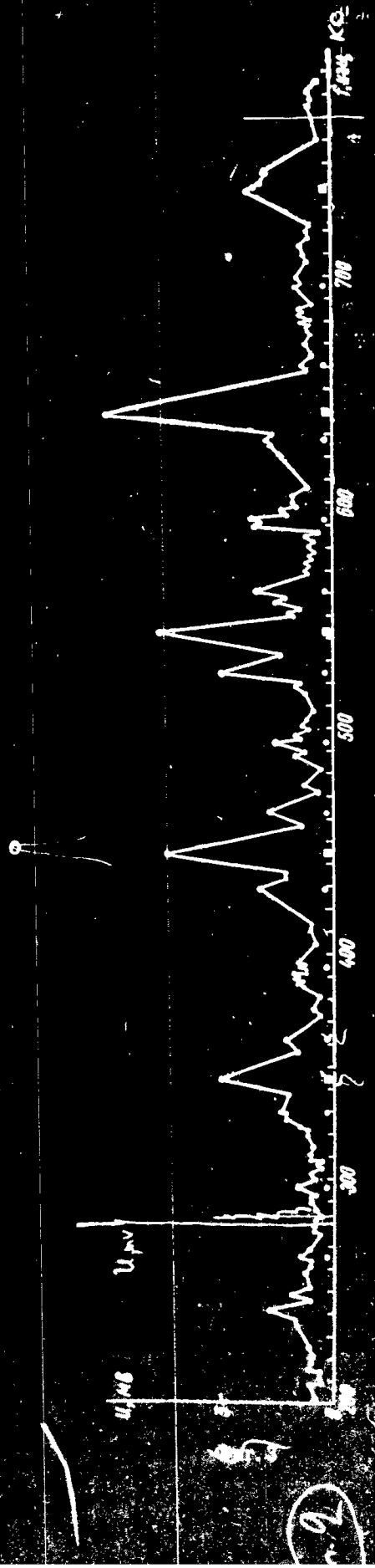
лана сферическая полость радиусом 7,5 *мм*, которую можно было заполнять исследуемой жидкостью. Для удобства смены жидкости, введения в полость измерительных устройств и для визуального наблюдения в сфере было сделано два секторных выреза. На фиг. 1 показан разрез этого концентратора, а на фиг. 2 — его внешний вид.

Если такой концентратор оклеить тонким слоем пьезоэлектрической мозаики, то амплитуда колебаний стенок полости будет максимальной, когда частота какой-либо гармоники радиальных колебаний совпадает с основной резонансной частотой мозаики, $f_{мозаики} = nf_{рад}$. Поскольку расчетная резонансная частота радиальных колебаний концентратора лежит около 33 *кгц*, а собственная резонансная частота пьезоэлектрической мозаики из керамики титаната бария ~ 580 *кгц*, концентратор должен наиболее интенсивно работать вблизи 18-й гармоники радиальных колебаний; на соседних гармониках амплитуда колебаний стенки полости будет несколько ниже.

На фиг. 3 показана частотная характеристика концентратора. По оси абсцисс отложена частота электрического напряжения f, подаваемого на пьезоэлектрическую мозаику (при $u_{ген} = \text{const}$), а по оси ординат — напряжение и на гидрофоне, помещенном в центр полости. В качестве приемника звуковых давлений (гидрофона) использовался миниатюрный шарик из титаната бария диаметром $\sim 0{,}2$ *мм* [2] с прямолинейной частотной характеристикой в измеряемой области частот. Как видно из фиг. 3, частотная характеристика концентратора имеет ряд пиков, причем наибольшие пики, как и следовало ожидать, расположены в области собственной частоты пьезоэлектрической мозаики (580 *кгц*). Нетрудно видеть, что имеется два ряда пиков: отстоящие друг от друга на ~ 33 *кгц* и отстоящие на ~ 100 *кгц*. Первые относятся к гармоникам радиальных колебаний алюминиевой сферы, вторые — к гармоникам резонанса полости (гармоники резонанса полости только нечетные). Для наглядности под характеристи-

Declassified in Part - Sanitized Copy Approved for Release 2013/04/15 : CIA-RDP80T00246A019600290001-3

Declassified in Part - Sanitized Copy Approved for Release 2013/04/15 : CIA-RDP80T00246A019600290001-3



Фиг. 5

кой точками отмечены резонансы сферы, а квадратиками — резонансы полости.

На фиг. 4 по оси абсцисс отложены номера гармоник радиальных колебаний алюминиевой сферы, а по оси ординат — соответствующие им частоты. Фиг. 5, аналогичная фиг. 4, относится к резонансным колебаниям полости. Точками и темными квадратиками на фиг. 4 и 5 отмечены резонансы, полученные из частотной характеристики, изображенной на фиг. 3. Кружочками и светлыми квадратиками отмечены резонансы, полученные из частотной характеристики, снятой с электрической стороны концентратора (фиг. 6). Из фиг. 4 и 5 видно, что собственные частоты действительно хорошо укладываются на прямую линию, проходящую через начало координат.

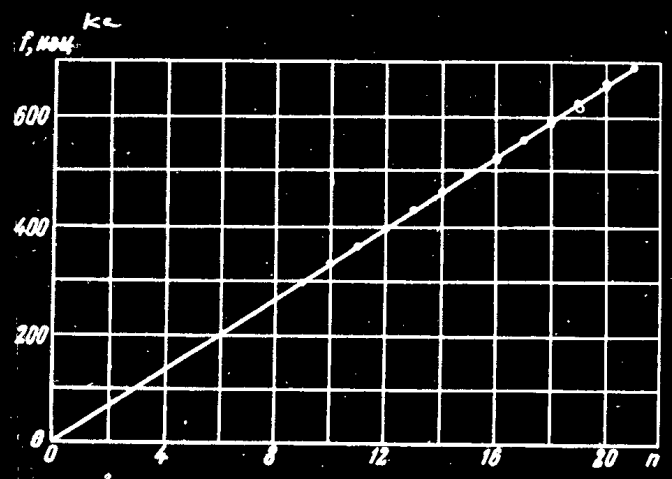
Из частотной характеристики видно, что резонансы сферы и полости не совпадают, что, конечно, сильно уменьшает общий коэффициент усиления концентратора. Однако попытка их совместить не привела к успеху, так как небольшая ошибка при изменении радиуса полости (например, на 2,5%) приводит к смещению пика на 10—12-й гармонике примерно на четверть длины волны. Но даже при несовпадении этих резонансов коэффициент усиления в центре концентратора получается достаточным, чтобы получить кавитацию в полости, заполненной водой. Так, например, на частотах 543, 561, 593, 628 и 640 *кгц* кавитация возникала при напряжении на пьезоэлектрической мозаике, равном примерно 15—25 *в*.

Задача измерения величины коэффициента усиления концентратора связана с большими экспериментальными трудностями и выходит за пределы настоящей статьи.

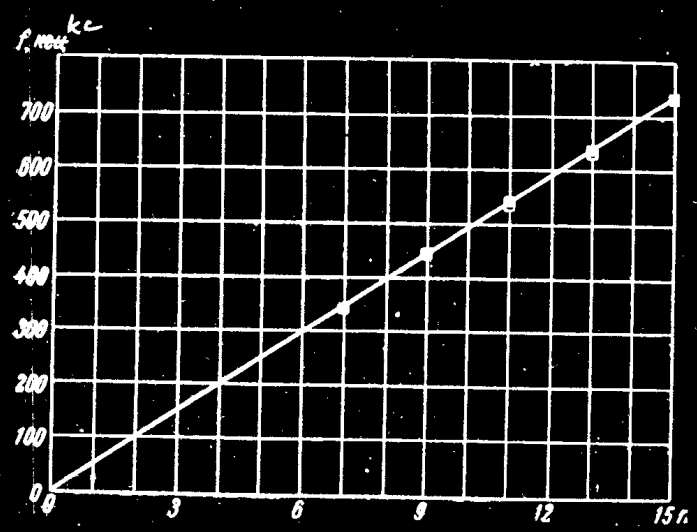
На фиг. 6 показан участок частотной характеристики концентратора, снятый с электрической стороны. При этом генератор электрических колебаний соединялся с пьезоэлектрической мозаикой через сопротивление, напряжение на котором изменялось в зависимости от величины эквивалентного сопротивления концентратора. На фиг. 6 по оси ординат отложено напряжение U на этом сопротивлении. Измерения проводились при двух состояниях концентратора: полость залита водой (сплошная кривая) и полость без воды (пунктирная кривая). По этим кривым можно определить механические добротности концентратора в этих двух состояниях. Так, например, на частоте 593 *кгц* добротность концентратора в воде (добротность, обусловленная [illegible] которым в полости [illegible] $Q_1 = 53{,}3$ [illegible] $Q_2 = 8$[illegible] обусловленная [illegible] мах[illegible] ма). Зная эти добротности, можно [illegible]

Declassified in Part - Sanitized Copy Approved for Release 2013/04/15 : CIA-RDP80T00246A019600290001-3

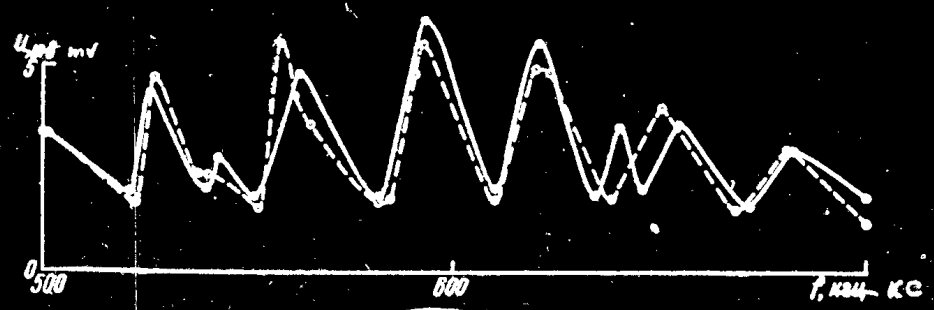
Declassified in Part - Sanitized Copy Approved for Release 2013/04/15 : CIA-RDP80T00246A019600290001-3



Фиг. 4



Фиг. 5



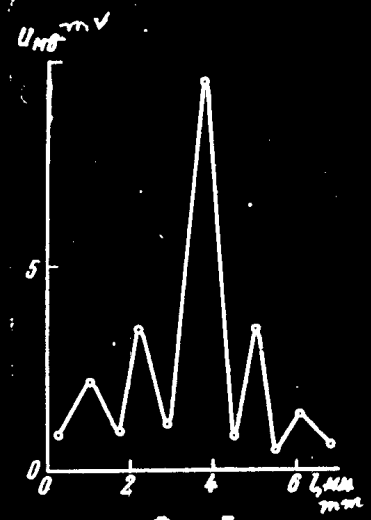
~~Фиг. 6~~

фиг 3

Declassified in Part - Sanitized Copy Approved for Release 2013/04/15 : CIA-RDP80T00246A019600290001-3

Declassified in Part - Sanitized Copy Approved for Release 2013/04/15 : CIA-RDP80T00246A019600290001-3

чить коэффициент преобразования подводимой мощности в мощность, излучаемую в воду [3]: $\eta = 1 - \frac{Q_1 f_2}{Q_2 f_1} \simeq 30\%$. Наконец, на фиг. 7 приведено распределение звукового давления в одной из плоскостей фокального пятна концентратора на частоте 640 *кгц*. Распределение давления измерялось тем же миниатюрным приемником, который мог перемещаться в пространстве при помощи координатного устройства в трех направлениях. По оси ординат отложена электродвижущая сила, развиваемая приемником, по оси абсцисс — расстояние l в миллиметрах. Радиус фокального пятна, полученный экспериментально, 0,42 *мм*, оказался несколько меньше теоретического 0,46 *мм* [4].



Фиг. 7

Таким образом, данная работа показывает возможность использования твердого тела в качестве фокусирующего устройства с последующей передачей сфокусированного звука в жидкость, что в некоторых случаях может быть более выгодным, чем использование для фокусирования самой исследуемой жидкости.

Автор выражает благодарность Л. Д. Розенбергу и М. А. Исаковичу за ряд полезных советов.

ЛИТЕРАТУРА

1. М. А. Исакович. Резонансное устройство из твердого материала для фокусирования ультразвука. Акуст. ж., 1962, 8, 1, 132—136.
2. Е. В. Романенко. Миниатюрные пьезоэлектрические приемники ультразвука. Акуст. ж., 1957, 4, 3, 342—347.
3. М. Г. Сиротюк. О балансе энергии в концентраторе, предназначенном для получения ультразвука высокой интенсивности. Акуст. ж., 1960, 6, 3, 410—411.
4. Д. Л. Розенберг. О концентраторах ультразвука. Тр. комис. по акустике АН СССР, 1955, 8, 102—113.

Акустический институт АН СССР
Москва

Поступила в редакцию
7 июля 1961 г.

Declassified in Part - Sanitized Copy Approved for Release 2013/04/15 : CIA-RDP80T00246A019600290001-3

Declassified in Part - Sanitized Copy Approved for Release 2013/04/15 : CIA-RDP80T00246A019600290001-3
STAT

SOLID FOCUSING ULTRASONIC CONCENTRATORS

By

M. G. Sirotyuk

(Reprint from ACOUSTIC JOURNAL, Academy of Sciences of the USSR, vol. VIII, No. 1, 1962)

The possibility of using solids as focusing devices for the subsequent transmission of focused sound to fluid is shown here. In some cases this turns out to be more expedient than focusing with the fluid investigated.

High sound pressures are obtained by means of various types of concentrators such as concave radiators, lenses, mirrors and so on. These devices bring about a converging wavefront in the fluid. In the focal spot area of such concentrators pressures engendering cavitation are readily obtainable. As the sound intensity increases, however, cavitation begins to form already before the focal spot, hence the increase of sound pressure at the focal spot proper is retarded.

Moreover, at a high intensity of the focused sound nonlinear effects of waveform distortion begin to appear in the fluid. As it propagates in the fluid, a sinusoidal wave gradually changes into a saw-toothed one, energy is transferred from the fundamental to higher harmonics as a result of which nonlinear absorption increases in the fluid. This effect, too, restricts the growth of sound pressure at the focal spot.

Declassified in Part - Sanitized Copy Approved for Release 2013/04/15 : CIA-RDP80T00246A019600290001-3

Declassified in Part - Sanitized Copy Approved for Release 2013/04/15 : CIA-RDP80T00246A019600290001-3

If we create a converging wave front in a solid and feed sound energy into the fluid when oscillation has reached the required magnitude, it becomes possible to considerably reduce the difficulties mentioned above.

We endeavored to obtain a converging wave front in some solids, e.g., in an aluminum hemisphere provided at the outside with plane platforms on which piezoelectric mosaic is glued, in a system having the form of a paraboloid of revolution, and others. In addition to the waves of the required form, however, many other types of oscillations were present in these concentrators, hence their efficiency was fairly low.

To produce a symmetric converging front Isakovich /1/ suggested the use of a solid sphere having in its center a hollow filled with the fluid investigated.

If the surface of such a sphere is excited in phase by, e.g,, a piezoelectric mosaic, one can obtain radial symmetric oscillations in their pure form. If in the case of a traveling wave the increase in spherical concentrate is 2 kb (where k is the wave number and b is the radius of the sphere) then by exciting the sphere by the resonance frequencies of its radial oscillations we can obtain an additional resonance gain. Its magnitude depends on the losses in the material of the sphere. If the inner cavity, too, is tuned in resonance, then we obtain another resonance gain whose magnitude is determined by the losses in the fluid filling the cavity. The greatest amplitude in the displacement of

Declassified in Part - Sanitized Copy Approved for Release 2013/04/15 : CIA-RDP80T00246A019600290001-3

Declassified in Part - Sanitized Copy Approved for Release 2013/04/15 : CIA-RDP80T00246A019600290001-3

the cavity walls (and, accordingly, the greatest efficiency) are due to occur when the resonances of the radial oscillations of the sphere and the cavity coincide.

To have maximum pressure at the center of the cavity and a node of pressures on its boundary (this inhibits the arising of cavitation on the interface between the fluid and the solid) the cavity diameter must be equal to a whole odd half-wave number. However, on account of losses in the fluid filling the cavity (losses in the middle of the sphere may be disregarded) there will be in the concentrator alongside the standing wave a traveling wave which carries the energy from the generator.

As is shown in [1] the concentrator gain is $K = b/a\varepsilon$, where b and a are the radii of the sphere and the cavity, respectively; ε is the tangent of the angle of losses in the fluid.

To check these considerations we tested a concentrator made of an aluminum sphere with a 100 mm radius. In its center it had a spherical cavity 7.5 mm in radius which could be filled with the fluid investigated. To facilitate the change of fluid, the introduction of instruments into the cavity and to make visual observation easier, two segments were cut off from the sphere. Figure 1 shows the cross section of this concentrator while Fig. 2 gives its external view.

If around such a concentrator we glue a thin layer of piezoelectric mosaic the amplitude of oscillations of the cavity walls will be maximal when the frequency

Declassified in Part - Sanitized Copy Approved for Release 2013/04/15 : CIA-RDP80T00246A019600290001-3

Declassified in Part - Sanitized Copy Approved for Release 2013/04/15 : CIA-RDP80T00246A019600290001-3

of any harmonic of radial oscillations coincides with the fundamental mosaic resonance frequency, $f_{mos} = nf_{rad}$. Since the rated resonance frequency of radial concentrator oscillations ranges in the neighborhood of 33 kc while self-resonant frequency of the piezoelectric mosaic of barium titanate ceramics is around 580 kc the concentrator is bound to work most intensively near the 18th harmonic of radial oscillations. On the neighboring harmonics the amplitude of cavity wall oscillations will be somewhat smaller.

Fig. 1. Fig. 2.

Figure 3 shows the frequency-response curve of the concentrator. The frequency f of the voltage fed to the piezoelectric mosaic (with u_{gen} = const) is plotted against the abscissa, while voltage on the hydrophone placed in the center of the cavity is plotted against the ordinate. We used as a hydrophone a tiny barium titanate sphere about 0.2 mm in diameter [2] with a rectilinear

Declassified in Part - Sanitized Copy Approved for Release 2013/04/15 : CIA-RDP80T00246A019600290001-3

Declassified in Part - Sanitized Copy Approved for Release 2013/04/15 : CIA-RDP80T00246A019600290001-3

Fig. 3.

Declassified in Part - Sanitized Copy Approved for Release 2013/04/15 : CIA-RDP80T00246A019600290001-3

Declassified in Part - Sanitized Copy Approved for Release 2013/04/15 : CIA-RDP80T00246A019600290001-3

frequency-response curve in the frequency range investigated. As is seen from Fig. 3, the frequency-response curve of the concentrator has a number of peaks, those of the greatest magnitude occurring (as this should have been expected) in the range of self-resonant frequency of the piezoelectric mosaic (580 kc). We can readily see that there are two kinds of peaks, viz., those at a distance of about 33 kc and others at a distance of about 100 kc from each other. The former relate to harmonics of radial oscillations of the aluminum sphere, whereas the latter relate to harmonics of cavity resonance (which are only odd). For greater clearness the dots under the curve designate the resonances of the sphere while the squares denote resonances of the cavity.

In Fig. 4 the harmonic numbers of radial oscillations of the aluminum sphere are plotted against the abscissa and the corresponding frequencies against the ordinate. Figure 5, analogous to Fig. 4, shows the resonance oscillations of the cavity. The dots and dark squares in Figs 4 and 5 designate resonances obtained from the frequency-response curve in Fig. 3. Circles and light squares denote resonances obtained from the frequency-response curve taken at the input of the concentrator (Fig. 6). From Figs. 4 and 5 we can see that self-resonant frequencies do fit well on the straight line passing through the origin of the coordinates.

We see from the frequency-response curve that

Declassified in Part - Sanitized Copy Approved for Release 2013/04/15 : CIA-RDP80T00246A019600290001-3

Declassified in Part - Sanitized Copy Approved for Release 2013/04/15 : CIA-RDP80T00246A019600290001-3

Fig. 4.

Fig. 5.

Fig. 6.

Declassified in Part - Sanitized Copy Approved for Release 2013/04/15 : CIA-RDP80T00246A019600290001-3

Declassified in Part - Sanitized Copy Approved for Release 2013/04/15 : CIA-RDP80T00246A019600290001-3

the resonances of the sphere and the cavity do not coincide. This, of course, reduces considerably the aggregate magnification of the concentrator. However, the attempt to make them coincide was unsuccessful since a small error in changing the cavity radius (e.g., by 2.5%) leads to a displacement of the peak on the tenth to twelfth harmonics by about one-quarter of the wavelength. Yet, even if these resonances do not coincide, the magnification at the center of the concentraror is sufficiently great to obtain cavitation in the water-filled cavity. Thus, e.g., at frequencies of 543, 561, 593, 628 and 640 kc cavitation was engendered by a voltage of approximately 15-25 v at the piezoelectric mosaic.

Measurement of the magnification of the concentrator involves considerable experimental difficulties and exceeds the scope of this paper.

Figure 6 shows a section of the frequency-response curve taken at the input of the concentrator. The electric oscillation generator was connected with the piezoelectric mosaic by a resistor on which voltage changed in relation to the magnitude of the equivalent concentrator resistance. Voltage U on this resistor is plotted atainst the ordinate (Fig. 6). Measurements carried out with a water-filled cavity are shown by the solid line, whereas the dashed line shows the measurements effected with no water in the cavity. It is possible with the aid of these curves to determine the Q-factor of the concentrator at the two states just mentioned. Thus, e.g., at frequency 593 kc the Q-factor is $Q_1 = 59.3$ with water

Declassified in Part - Sanitized Copy Approved for Release 2013/04/15 : CIA-RDP80T00246A019600290001-3

Declassified in Part - Sanitized Copy Approved for Release 2013/04/15 : CIA-RDP80T00246A019600290001-3

(depending on mechanical losses and radiation into the water) and $Q_2 = 85$ without water (depending only upon mechancial losses). If we know these Q-factors we can obtain the factor for the conversion of input into power radiated into the water [3]: $\eta = 1 - Q_1 f_2 / Q_2 f_1 \simeq 30\%$.

Fig. 7.

Finally, Fig. 7 shows the distribution of sound pressure in one of the planes of the focal spot of the concentrator at a frequency of 640 kc. The distribution of pressure was measured with the same miniature hydrophone which could move in space with the aid of a three-directional coordinate device. The emf developed by the receiver is plotted against the ordinate and distance l in millimeters is plotted against the abscissa. The radius of the focal spot determined experimentally was 0.42 mm long and turned out to be slightly smaller than

Declassified in Part - Sanitized Copy Approved for Release 2013/04/15 : CIA-RDP80T00246A019600290001-3

Declassified in Part - Sanitized Copy Approved for Release 2013/04/15 : CIA-RDP80T00246A019600290001-3

the theoretical one (0.46 mm) [4].

Thus it has been shown in this paper that solids can be used as focusing devices and that the sound focused by them can be transmitted to the fluid. In some cases this is more expedient than to use for focusing the fluid investigated.

The author thanks L. D. Rozenberg and M. A. Isakovich for their valuable advice.

REFERENCES

1. M. A. Isakovich. Rezonansnoye ustroystvo iz tverdogo materiala dlya fokusirovaniya ul'trazvuka. (Solid Resonant Devices for Ultrasonic Focusing). Akusticheskiy Zhurnal (Acoustic Journal), 1962, vol. 8, No. 1, p. 132-136.
2. Ye. V. Romanenko. Miniatyurnyye p'yezoelektricheskiye priyemniki ul'trazvuka. (Miniature Piezoelectric Ultrasonic Receivers). Acoustic Journal, 1957, vol. 4, No. 3, p. 342-347.
3. M. G. Sirotyuk. O balanse energii v kontsentratore, prednaznachennom dlya polucheniya ul'trazvuka vysokoy intensivnosti. (Energy Balance in Concentrators Designed for Producing High Intensity Ultrasound). Acoustic Journal, 1960, vol. 6, No. 3, p. 410-411.
4. D. L. Rozenberg. O kontsentratorakh ul'trazvuka. (Ultrasound Concentrators). Transactions of the Acoustics Commission of the Academy of Sciences of the USSR, 1955, vol. 8, p. 102-113.

Acoustic Institute of the Academy of Sciences of the USSR, Moscow

Received by editorial offices on 7th July, 1961.

Declassified in Part - Sanitized Copy Approved for Release 2013/04/15 : CIA-RDP80T00246A019600290001-3

Declassified in Part - Sanitized Copy Approved for Release 2013/04/15 : CIA-RDP80T00246A019600290001-3

STAT

АКАДЕМИЯ НАУК СССР

АКУСТИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

ТОМ VIII

Выпуск 2

(ОТДЕЛЬНЫЙ ОТТИСК)

МОСКВА 1962

Declassified in Part - Sanitized Copy Approved for Release 2013/04/15 : CIA-RDP80T00246A019600290001-3

Declassified in Part - Sanitized Copy Approved for Release 2013/04/15 : CIA-RDP80T00246A019600290001-3

АКУСТИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

Том VIII 1962 Вып. 2

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА РАЗВИТИЯ УЛЬТРАЗВУКОВОЙ КАВИТАЦИИ НА ЧАСТОТЕ 500 *кгц*

М. Г. Сиротюк

При помощи сверхскоростной фоторегистрирующей установки исследовалось развитие и протекание кавитации на частоте 500 *кгц* в фокальном пятне ультразвукового концентратора. Выяснилось, что за один или несколько периодов акустических колебаний зародыш может превратиться в область кавитации размером в несколько десятых долей миллиметров. Оказалось, что порог кавитации для дегазированной воды составляет в фокальном пятне 380 *атм*.

Исследование процесса развития ультразвуковой кавитации производилось в фокальной области концентратора, описанного в работе [1], на его резонансной частоте ~ 500 *кгц*. Процесс кавитации изучался с помощью сверхскоростной фоторегистрирующей установки СФР. Камера СФР может быть использована либо как фоторегистратор с непрерывной разверткой исследуемого процесса на неподвижной кинопленке, либо как «лупа времени», дающая ряд последовательных фотографий процесса при скоростях съемки до $2{,}5 \cdot 10^6$ *кадр/сек*. При работе камеры в варианте «лупы времени» изображение при помощи двух объективов и ряда линз (линзовая вставка) строится на неподвижной кинопленке, расположенной по дуге окружности, в центре которой вращается зеркало. При вращении зеркала на пленке получается ряд кадров — изображений объекта. Пучок света переходит с одной линзы на другую при весьма малых поворотах зеркала и величина смазывания вертикального края изображения меньше, чем разрешающая способность оптической системы. На входном объективе расположены прямоугольные диафрагмы, смещенные по вертикали и горизонтали, ограничивающие время экспонирования каждого кадра.

Электронное синхронизирующее устройство камеры СФР позволяет синхронизировать начальное положение зеркала и инициирующий импульс со временем прихода акустических колебаний в район фокального пятна концентратора.

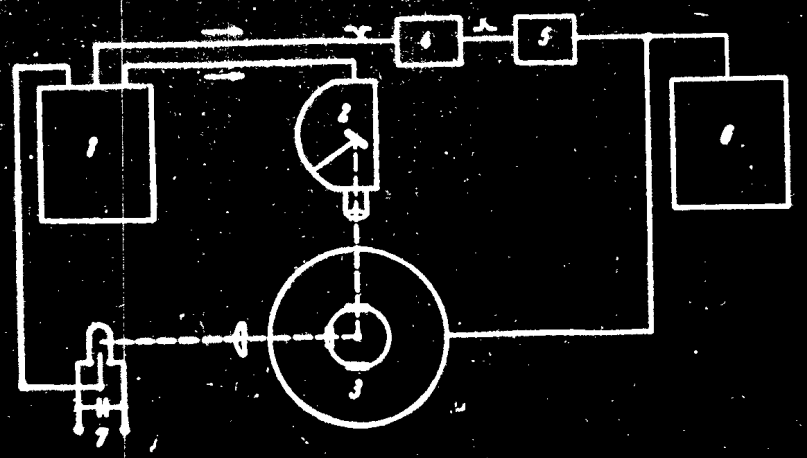
На фиг. 1 показана блок-схема экспериментальной установки для сверхскоростной киносъемки развития ультразвуковой кавитации: *1* — пульт управления СФР, *2* — камера СФР, *3* — ультразвуковой концентратор, *4* — ГИС-2, *5* — дифференцирующее устройство, *6* — электрический генератор, *7* — импульсная лампа. В момент включения электрического генератора, питающего концентратор, в дифференцирующем устройстве вырабатывается импульс, который подается на генератор прямоугольных импульсов ГИС-2. Генератор ГИС-2 позволяет получить на выходе импульс, задержанный относительно запускающего. При совпадении этого импульса с каким-либо из импульсов, образующимся при вращении зеркала в камере, электрическая схема пульта управления вырабатывает инициирующий импульс высокого напряжения, зажигающий лампу *7*. Полное время съемки примерно равняется длительности вспышки лампы.

Нами использовалась импульсная лампа ИФК-120, работавшая при максимальной нагрузке. Для увеличения яркости применялась линза, концентрировавшая свет лампы в фокальной области концентратора.

Declassified in Part - Sanitized Copy Approved for Release 2013/04/15 : CIA-RDP80T00246A019600290001-3

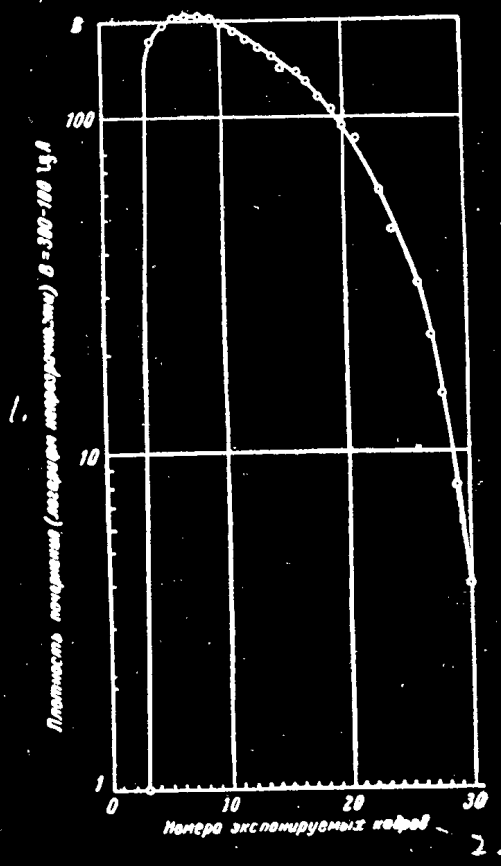
Declassified in Part - Sanitized Copy Approved for Release 2013/04/15 : CIA-RDP80T00246A019600290001-3

Процесс развития кавитации фотографировался при частоте съемки $5 \cdot 10^4$ кадр/сек. При этом время экспонирования одного кадра составляло $2 \cdot 10^{-6}$ сек, т. е. на один кадр изображения приходился один период ультразвуковых колебаний. Количество кадров (при двухрядной линзовой вставке) было равно 60.



Фиг. 1

Как известно, разряд в импульсной лампе начинается практически сразу после подачи инициирующего импульса и максимум световой энергии приходится на первую половину общего времени разряда. Кинопленка при этом экспонируется неравномерно. Для определения этой неравномерности было произведено экспонирование пленки в камере от световой вспышки. На фиг. 2 по оси ординат отложена величина плотности почернения B, измеренная микрофотометром МФ-4, а по оси абсцисс — порядковые номера ряда последовательных кадров на кинопленке; время экспонирования каждого кадра постоянно ($2 \cdot 10^{-6}$ *сек*). Как видно из графика, достаточная плотность снимка достигается только, начиная с 3-го кадра, причем при экспонировании 6, 7 и 8 кадров яркость свечения такова, что плотность почернения кинопленки практически не изменяется. В дальнейшем яркость быстро падает.



Фиг. 2

Эксперименты по исследованию развития ультразвуковой кавитации проводились как в отстоявшейся при комнатной температуре, так и в тщательно дегазированной дистиллированной воде. Вода заливалась в реакторный стакан концентратора [1], который отделялся от остального внутреннего объема концентратора при помощи тонкой пленки. Дегазирование воды производилось под вакуумом при одновременном облучении ультразвуком, до полного прекращения выделения пузырей. Интенсивности звука и акустические давления в фокальном пятне кон-

Declassified in Part - Sanitized Copy Approved for Release 2013/04/15 : CIA-RDP80T00246A019600290001-3

Declassified in Part - Sanitized Copy Approved for Release 2013/04/15 : CIA-RDP80T00246A019600290001-3

центратора, соответствующие [illegible] стоявшейся и дегазированной [illegible].

Определение средней [illegible] ке, описанной в работе [2]. [illegible] кального пятна находились графически [illegible] полученного распределения давлений в [illegible]. Давления рассчитывались

Состояние воды	[illegible]	[illegible]	[illegible]
Отстоявшаяся	~ 2.000	~ 8.000	~100
Дегазированная	~ 6.000	~24.000	~270
»	~12.000	~48.000	~380

для синусоидальной волны. Однако можно ожидать, что при полученных очень больших величинах давлений форма волны будет пилообразной и пиковая величина давления будет несколько больше.

Возникновение кавитации отмечалось двумя способами: 1) при визуальном наблюдении зоны фокального пятна через микроскоп и 2) по возникновению кавитационного шума, воспринимаемого гидрофоном, помещенным от фокального пятна, на расстоянии 50 *мм*, чтобы не деформировать форму поля и не понизить порог возникновения кавитации.

На фиг. 3 показаны фотографии уже развивавшейся (стационарной) кавитации в отстоявшейся воде. Здесь, как и на других фигурах, приведен последовательный ряд позитивных отпечатков, взятых через один кадр. Перед первым кадром этой и последующих фигур дан линейный масштаб: одно деление — один *мм**.

На кадрах 2—3 экспозиция недостаточна вследствие малой яркости свечения импульсной лампы; кадры 4—12 переэкспонированы. Поэтому структура кавитации становится различимой, лишь начиная с 14-го кадра.

Сравнивая кадр 3 и какой-либо из последних кадров, например 21-й, можно видеть, что за время съемки — около $100 \cdot 10^{-6}$ *сек* — общая форма кавитационной области мало изменяется.

Вверху области кавитации на кадрах наблюдаются восходящие «ветви», по-видимому, представляющие собой движущиеся вверх, вместе с потоком жидкости, газовые пузырьки, образующиеся вследствие кавитационной дегазации воды. При кавитации в дегазированной воде таких пузырьков не наблюдается. В последнем случае, по-видимому, имеет место так называемая «паровая кавитация», когда кавитационная полость заполняется только парами воды и в полупериод сжатия захлопывается полностью.

На фиг. 4 показан типичный процесс зарождения кавитации в дегазированной воде. Зарождение кавитации хорошо видно, поскольку она появляется лишь через шесть кадров после начала экспонирования пленки в момент прихода звуковых колебаний в фокальное пятно концентратора. Здесь количество кавитационных скоплений непрерывно растет от кадра к кадру. Непрерывно растут по величине и сами скопления; особенно наглядно это видно на фиг. 5. При оптимальной яркости свечения импульсной лампы, начиная с 20—21-го кадра здесь также лучше проявляется тонкая структура кавитационных скоплений; в то же время небольшие скопления кавитации из-за малой освещенности на снимке пропадают.

На основании проведенной экспериментальной работы и обработки большого числа фотографий, показывающих зарождение и протекание

* Заметим, что центр фотографий отвечает центру фокального пятна.

Declassified in Part - Sanitized Copy Approved for Release 2013/04/15 : CIA-RDP80T00246A019600290001-3

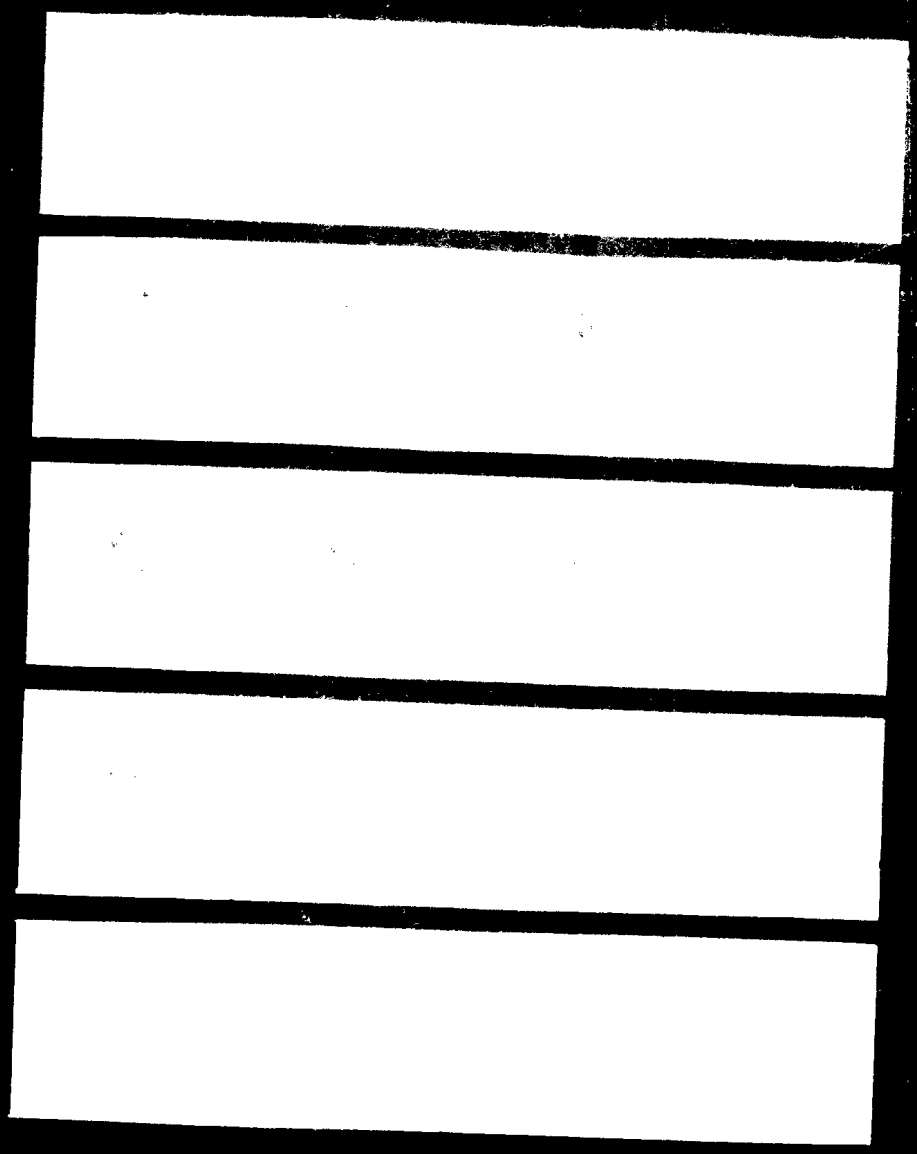
Declassified in Part - Sanitized Copy Approved for Release 2013/04/15 : CIA-RDP80T00246A019600290001-3

Фиг. 4

Фиг. 3

Declassified in Part - Sanitized Copy Approved for Release 2013/04/15 : CIA-RDP80T00246A019600290001-3

Declassified in Part - Sanitized Copy Approved for Release 2013/04/15 : CIA-RDP80T00246A019600290001-3



Фиг. 5

Declassified in Part - Sanitized Copy Approved for Release 2013/04/15 : CIA-RDP80T00246A019600290001-3

Declassified in Part - Sanitized Copy Approved for Release 2013/04/15 : CIA-RDP80T00246A019600290001-3

[illegible] на частоте ~ 500 *кгц*, мож-
[illegible]

1. Порог кавитации для [illegible] воды, в которой существуют нерастворимые газовые пузырьки, составляет ~160 *атм* (давление в центре фокального пятна); для [illegible] воды он возрастает в отдельных случаях до ~ 380 *атм* (см. таблицу).

2. Кавитация зарождается, как правило, не в центре фокального пятна. Это значит, что для появления кавитации наряду с большим давлением необходимо также и наличие зародышей, местоположение которых случайно, а их количество [illegible].

3. За один или несколько периодов акустических колебаний зародыш может превратиться в область кавитации, имеющую диаметр в несколько десятых долей миллиметров (см., например, фиг. 5). В дальнейшем область кавитации растет от периода к периоду и за время нескольких десятков, а иногда и сотен микросекунд достигает размера нескольких миллиметров в диаметре.

Автор пользуется случаем поблагодарить Л. Д. Розенберга за внимание к работе.

ЛИТЕРАТУРА

1. Л. Д. Розенберг, М. Г. Сиротюк. Установка для получения фокусированного ультразвука высокой интенсивности. Акуст. ж., 1959, 5, 2, 206—211.
2. М. Г. Сиротюк. О балансе энергии в концентраторе, предназначенном для получения ультразвука высокой интенсивности. Акуст. ж., 1960, 6, 3, 410—411.

Акустический институт АН СССР
Москва

Поступила в редакцию
4 июня 1961 г.

Declassified in Part - Sanitized Copy Approved for Release 2013/04/15 : CIA-RDP80T00246A019600290001-3

Declassified in Part - Sanitized Copy Approved for Release 2013/04/15 : CIA-RDP80T00246A019600290001-3

STAT

EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF THE DEVELOPMENT OF ULTRASONIC CAVITATION AT A FREQUENCY OF 500 kc

By

M. G. Sirotyuk

(Reprint from ACOUSTIC JOURNAL, Academy of Sciences of the USSR, vol. VIII, No. 2, 1962.

The development of cavitation at a frequency of 500 kc at the focal spot of an ultrasonic concentrator was studied with the aid of a superhighspeed camera. It was found that during one or several periods of acoustic oscillations a small hole can grow into a cavity several tenths of a millimeter in size. Cavitation threshold for gas-free water at the focal spot was found to be 380 atmospheres.

The development of ultrasonic cavitation was studied in the focal area of a concentrator described in /1/ at a resonance frequency of about 500 kc. This was done with the aid of a superhighspeed SFR camera used either for the uninterrupted recording of the process investigated on a motionless film or as a "slow-motion" camera taking a series of successive shots of the process with exposures up to 2.5×10^6 frame/sec. When operating as a "slow-motion camera" the image with the aid of two objectives and a number of lenses (lens insert) is recorded on a motionless film placed along a circular arc. At the center of it a rotating mirror projects a

Declassified in Part - Sanitized Copy Approved for Release 2013/04/15 : CIA-RDP80T00246A019600290001-3

Declassified in Part - Sanitized Copy Approved for Release 2013/04/15 : CIA-RDP80T00246A019600290001-3

series of frames (images of the object) on the film. The pencil of rays passes from one lens to another at extremely small turns of the mirror, and the blurring of the vertical edge of the image is considerably less than the resolving power of the optical system. The inlet objective is provided with rectangular diaphragms displaced vertically and horizontally which limit the exposure of each frame.

The electronic synchronizing device of the SFR camera permits to synchronize the initial position of the mirror and the initial pulse with the time of arrival of the acoustic occillations in the area of the focal spot of the concentrator.

Fig. 1.

Figure 1 shows the block diagram of an experimental plant for the superhighspeed filming of ultrasonic cavitation. Here 1 is the SFR control desk, 2 is the SFR

Declassified in Part - Sanitized Copy Approved for Release 2013/04/15 : CIA-RDP80T00246A019600290001-3

Declassified in Part - Sanitized Copy Approved for Release 2013/04/15 : CIA-RDP80T00246A019600290001-3

camera, 3 is the ultrasonic concentrator, 4 is a GIS-2 generator, 5 is the differentiator, 6 is an electric generator, 7 is an oscillation tube. When the electric generator which feeds the concentrator is switched on, a pulse is generated in the differentiator from where it is fed to the square-pulse generator GIS-2. This generator yields at the output a pulse which is delayed with respect to the triggering pulse. Then this pulse coincides with any of the pulses formed by the rotation of the mirror in the camera the electric circuit of the control disc generates a high-voltage triggering pulse which fires tube 7. Total photographing time is roughly equal to the duration of the flash in the tube.

We used an IFK-120 tube operating under maximum load. To increase brightness we used a lens which concentrated the light from the tube in the focal area of the concentrator,

The development of cavitation was photographed at a rate of 5×10^5 frames per second. Exposure of each frame amounted to 2×10^{-6} sec, i.e., one frame corresponds to one period of ultrasonic oscillations. The number of frames (with a two-row lens insert) was 60.

As is known, discharge in the oscillation tube virtually begins immediately upon pulsing and luminous energy reaches a peak during the first half of the total discharge time. The film is exposed irregularly, and to determine this irregularity it was exposed to light flashes in the camera. In Fig. 2 the magnitude of film

Declassified in Part - Sanitized Copy Approved for Release 2013/04/15 : CIA-RDP80T00246A019600290001-3

Declassified in Part - Sanitized Copy Approved for Release 2013/04/15 : CIA-RDP80T00246A019600290001-3

blackening density B measured with a microphotometer MF-4 is plotted against the ordinate, while the serial numbers of a successive series of frames of the film are plotted against the abscissa. Exposure of each frame was constant (2×10^{-6} sec). We see from the diagram that the magnitude of blackening density becomes sufficient from the third frame on, and that for frames 6, 7 and 8 the brightness of the light source is such that the blackening density of the film remains virtually unchanged. Subsequently brightness decreases quite rapidly.

Fig. 2.

Key: 1) film blackening density (opacity logarithm) $B = 300 - 100 \log A$; 2) numbers of exposed frames.

Declassified in Part - Sanitized Copy Approved for Release 2013/04/15 : CIA-RDP80T00246A019600290001-3

Declassified in Part - Sanitized Copy Approved for Release 2013/04/15 : CIA-RDP80T00246A019600290001-3

Ultrasonic cavitation was investigated both in water standing at woom temperature as well as in carefully degassed distilled water. The fluid was poured into the reaction vessel of the concentrator [1] separated from the concentrator's remaining inner volume by means of a film. The water was degassed under vacuum and simultaneously exposed to ultrasound until bubble formation totally ceased. Sound intensity and pressure at the focal spot of the concentrator corresponding to cavitation threshold in still and gas-free water are given in the table.

Key: 1) state of water; 2) average sound intensity at focal spot, watt/cm^2; 3) maximum sound intensity at the center of focal spot, watt/cm^2; 4) peak pressure at the center of focal spot, atm; 5) still; 6) gas-free.

Average sound intensity was determined according to a procedure described in [2]. Maximum sound intensity at the center of the focal spot was determined graphically with the aid of experimental curves of pressure distribution in that spot. Pressures were calculated for sinusoidal waves. It may be expected, however, that with the very high pressures obtained the

Declassified in Part - Sanitized Copy Approved for Release 2013/04/15 : CIA-RDP80T00246A019600290001-3

Declassified in Part - Sanitized Copy Approved for Release 2013/04/15 : CIA-RDP80T00246A019600290001-3

wave will be saw-toothed in shape, hence peak pressure values will be somewhat higher.

The arising of cavitation was determined by 1) visually observing the focal spot area through a microscope, and 2) the occurrence of cavitation noise recorded by a hydrophone placed at a distance of 50 mm from the focal spot in order not to deform the field and not to lower the cavitation threshold.

Figure 3 shows the photographs of steady-state cavitation which already developed in still water. Here, as well as in the other figures we bring a successive series of positive prints of every other frame. The first frame of this and the following figures has a scale where one division corresponds to 1 millimeter.*

Frames 2 and 3 are underexposed because of insufficient brightness of the pulse tube, while frames 4 through 12 are overexposed. Thus the structure of cavitation becomes discernible only after the 14th frame.

If we compare frame 3 with any of the last ones, e.g., the twenty-first frame, we can see that for the entire duration of filming (about 100×10^{-6} sec) the overall shape of the cavitation region has hardly changed.

In the upper part we see ascending "branches" which apparantly consist of gas bubbles moving upward together with the flow of the fluid. These bubbles formed as a consequence of cavitation degassing of the water.

---

*The center of the photograph corresponds to the center of the focal spot.

Declassified in Part - Sanitized Copy Approved for Release 2013/04/15 : CIA-RDP80T00246A019600290001-3

Declassified in Part - Sanitized Copy Approved for Release 2013/04/15 : CIA-RDP80T00246A019600290001-3

Fig. 3.

Declassified in Part - Sanitized Copy Approved for Release 2013/04/15 : CIA-RDP80T00246A019600290001-3

Declassified in Part - Sanitized Copy Approved for Release 2013/04/15 : CIA-RDP80T00246A019600290001-3

Fig. 4.

Declassified in Part - Sanitized Copy Approved for Release 2013/04/15 : CIA-RDP80T00246A019600290001-3

Declassified in Part - Sanitized Copy Approved for Release 2013/04/15 : CIA-RDP80T00246A019600290001-3

On the other hand, these bubbles have not been seen in gas-free water. In this case there seems to take place the so-called "vapor cavitation", i.e., the cavity is filled only with water vapors and during the compression half-period it collapses completely.

Figure 4 shows a typical case of cavitation arising in gas-free water. It is easy to follow since cavitation arises only after 6 frames from the beginning of exposure when the sound oscillations reach the focal spot of the concentrator. Here the number of cavitation clusters grows continuously from frame to frame. Equally continuous is the growth in size of the clusters proper, as is shown very clearly in Fig. 5. The very fine structure of the cavitation clusters is better visible after frame 20 or 21 with optimal brightness of the oscillation tube. Small cavitation clusters, however, are invisible because of generally insufficient brightness of the light source.

On the basis of the tests and the large number of photographs showing the arising and development of cavitation at the focal spot of the concentrator at a frequency of approximately 500 kc the following inferences can be drawn.

1. Cavitation threshold in still water containing undissolved gas bubbles is approximately 160 atmospheres (pressure at the center of the focal spot); for gas-free water it rises in individual cases up to about 380 atmospheres (see table).

2. As a rule cavitation does not arise at the center of the focal spot. This means that alongside

Declassified in Part - Sanitized Copy Approved for Release 2013/04/15 : CIA-RDP80T00246A019600290001-3

Declassified in Part - Sanitized Copy Approved for Release 2013/04/15 : CIA-RDP80T00246A019600290001-3

Fig. 5.

Declassified in Part - Sanitized Copy Approved for Release 2013/04/15 : CIA-RDP80T00246A019600290001-3

Declassified in Part - Sanitized Copy Approved for Release 2013/04/15 : CIA-RDP80T00246A019600290001-3

high pressures the formation of cavitation also requires the presence of nuclei holes with a random position. Their number, however, is small.

3. During one or several periods of acoustic oscillations a nucleus can grow into a cavity with a diameter of several tenths of a millimeter (see, e.g., Fig. 5). Subsequently the cavity grows from period to period and attains in some tens and, occasionally, hundreds of microseconds the size of several millimeters in diameter.

The author seizes the occasion to thank L. D. Rozenberg for his valuable suggestions.

REFERENCES

1. L. D. Rozenberg, M. G. Sirotyuk, Ustanovka dlya polucheniya fokusirovannogo ul'trazvuka vysokoy intensivnosti. (Installation Producing Focused Ultrasounds of High Intensity). Akustikheskiy Zhurnal (Acoustic Journal), 1959, vol. 5, No. 2, pp. 206-211

2. M. G. Sirotyuk, O balanse energii v kontsentratore prednaznachennom dlya polucheniya ul'trazvuka yysokoy intensivnosti. (Energy Balance in Concentrators Designed for the Generation of High-Intensity Ultrasounds). Acoustic Journal, 1960, vol. 6, No. 3, pp. 410-411.

Acoustic Institute of the Academy of Sciences of the USSR, Moscow

Received by editorial offices on 4th June, 1961

Declassified in Part - Sanitized Copy Approved for Release 2013/04/15 : CIA-RDP80T00246A019600290001-3