

УСТАНОВКА ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ ФОКУСИРОВАННОГО
УЛЬТРАЗВУКА ВЫСОКОЙ ИНТЕНСИВНОСТИ*Л. Д. Розенберг, М. Г. Сиротюк*

Описывается ультразвуковой концентратор, в фокусе которого можно получить интенсивность в $60\text{--}70 \cdot 10^3 \text{ вт/см}^2$, и приводятся результаты предварительных его испытаний.

Получение ультразвуковых колебаний очень высокой интенсивности представляет интерес как с точки зрения изучения происходящих при этом чисто физических процессов (нелинейное поглощение, звуковой ветер, кавитация и так далее), так и с точки зрения применения очень больших звуковых давлений и скоростей для воздействия на вещество и на биологические структуры. Поэтому в последнее время появилось и продолжает появляться много работ в этой области.

Пределная интенсивность, которую до сих пор удавалось получить от плоского кварцевого излучателя, исчисляется сотнями вт/см^2 . Так, Скардс [1] оценивает полученные им интенсивности на частоте 380 кгц около 100 вт/см^2 , что соответствует амплитуде переменного давления 17 атм. Буров [2] получал кратковременные, длительностью в несколько секунд, импульсы на частоте 1,5 мгц интенсивностью 300 вт/см^2 (30 атм). Дальнейшее существенное увеличение интенсивности может быть получено при использовании фокусирующих систем. Последние обладают еще одним преимуществом: они позволяют локализовать нужную интенсивность в небольшом объеме, находящемся в глубине исследуемого тела, и позволяют, например при изучении биологических воздействий ультразвука, поражать глубокие слои биологических структур, не затрагивая поверхностных. Несколько таких установок описано в сборнике [3]. Так, Леман, Бальдес и Крузен [4], используя линзу из полистирола, получили на частоте 1,0 мгц интенсивность 110 вт/см^2 . Фрай и Фрай [5] применили четверенный вогнутый излучатель, что позволило на частоте 980 кгц добиться интенсивности в 1000 вт/см^2 (55 атм).

Как видно из этого краткого перечня, наибольшие интенсивности, полученные от фокусирующих систем, также не превосходят одного киловатта, а соответствующие пиковые давления — десятков атмосфер. При разработке описываемой ниже установки мы поставили перед собой задачу получения пиковых давлений порядка сотен атмосфер, что соответствует интенсивностям в десятки киловатт на см^2 , и таким образом, на два порядка превосходит полученные ранее результаты.

Вопрос об оптимальном типе ультразвукового концентратора был ранее рассмотрен одним из авторов в работе [6], из которой следует, что наилучшим в нашем случае является вогнутый фокусирующий излучатель. Из приведенных там соотношений видно, что для получения давлений в несколько сот атмосфер на частоте, например, 500 кгц, требуется сходящийся волновой фронт, обладающий потоком энергии около 10 киловатт. Задаваясь интенсивностью излучения с поверхности вогнутого излучателя в 10 вт/см^2 , мы видим, что излучающая поверхность должна быть порядка $0,1 \text{ м}^2$ и иметь радиус кривизны $20,0\text{--}30,0 \text{ см}$. При столь развитой поверхности, которая может быть реализована только при помощи мозаичного

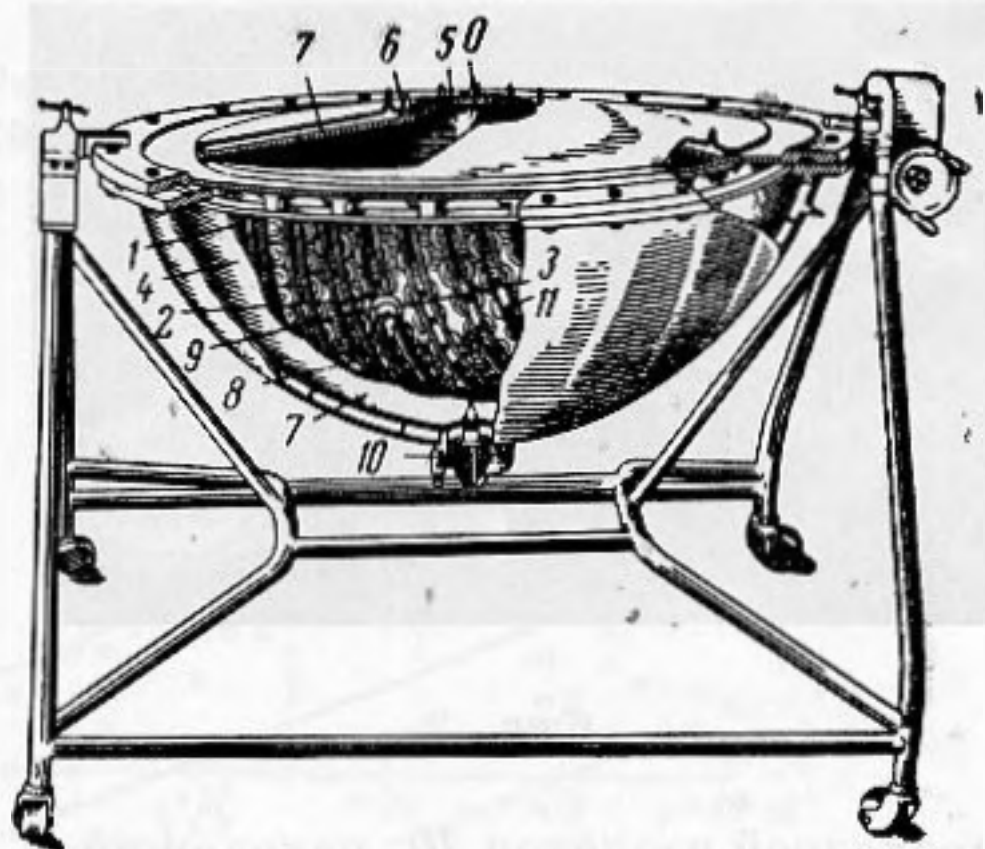
излучателя, самой серьезной трудностью является получение синфазного сходящегося волнового фронта. Хорошо известно, что реальные излучающие элементы из кварца и особенно из керамики титаната бария, наряду с нормальным излучением дают косые пучки, на образование которых подчас тратится значительная часть энергии. Эти косые пучки, не попадая в фокус, снижают концентрацию энергии в фокусе и вызывают лишь нагрев промежуточной среды. Кроме того, следует принять меры для устранения фазовой аберрации волнового фронта, так как последняя может существенно снизить эффект фокусирования.

В силу этих соображений мы отказались от мозаичной конструкции, например, типа, предложенного Вильямсом [7] и реализованного фирмой Браш. В качестве излучателя мы применили резонансную полуволновую алюминиевую оболочку сферической формы с углом раскрытия $\alpha_m = 70^\circ$, возбуждаемую с задней стороны большим количеством непосредственно сидящих на ней, небольших резонансных кварцевых излучателей.

Осуществление такой конструкции встречает некоторые технологические трудности, связанные с необходимостью изготовления с очень высокой точностью тонкостенного отрезка сферы большого радиуса. Но, как будет видно из дальнейшего, она вполне себя оправдала; кроме того, наличие такой герметизированной границы раздела между рабочим акустическим объемом и объемом, в котором расположены кварцевые излучатели, находящиеся под высоким напряжением, оказалось чрезвычайно удобным с точки зрения решения ряда конструктивных и эксплуатационных вопросов.

Выбор рабочей частоты определялся рядом обстоятельств: с ее увеличением уменьшаются размеры фокального пятна и, следовательно, растет степень концентрации (коэффициенты усиления по давлению и по скорости). С другой стороны, с ростом частоты растут потери в алюминиевой пластине и в рабочей жидкости; в последней растет не только обычное (линейное) затухание, которым в большинстве случаев можно пренебречь, но и дополнительное (нелинейное) [8], которое может дать существенное снижение давления в фокальном пятне. Учету этого фактора в фокусирующих системах посвящена работа Наугольных и Романенко [9]. Кроме того, с ростом частоты увеличиваются требования к точности механического выполнения и монтажа основных узлов и деталей. Исходя из всех изложенных выше соображений, была выбрана частота 500 кГц, соответствующая длине волны в воде 2,9 мм. Угол раскрытия концентратора выбран в 70° для того, чтобы вывести фокальную область за пределы внутреннего объема концентратора для удобства манипулирования и сквозного просмотра в горизонтальной плоскости. Кроме того, при углах, превышающих 70° , замедляется рост фактора фокусирования скорости x' [6].

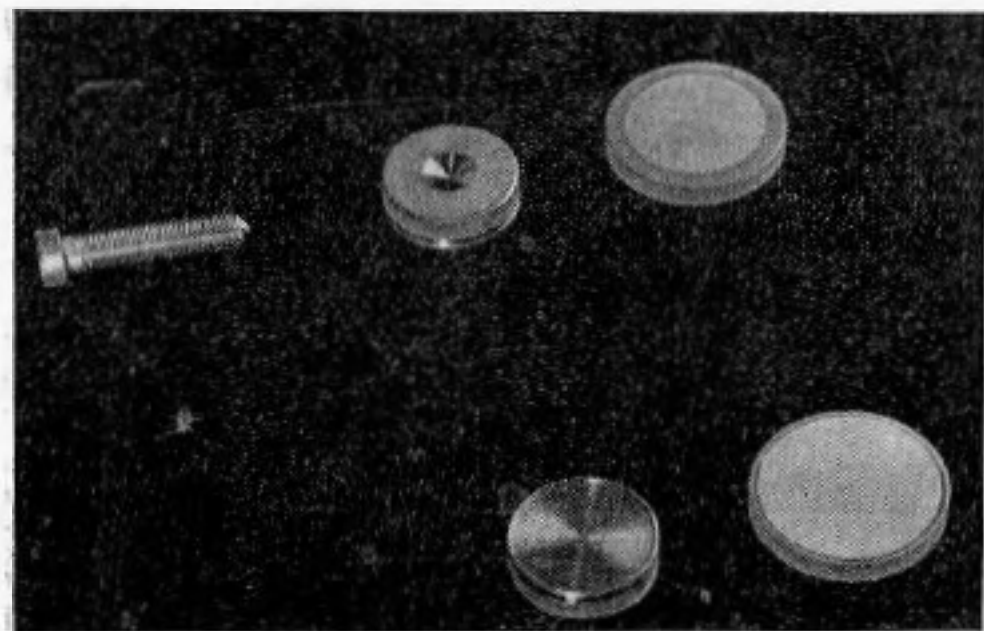
Конструкция излучателя показана схематически на фиг. 1. Сферическая алюминиевая оболочка 1 с внутренним радиусом 314 мм укреплена по краю к фланцу 6; центр кривизны этой оболочки (фокус излучателя) находится в точке 0. Пространство 5 внутри оболочки заполнено рабочей жидкостью. Для изоляции основной массы рабочей жидкости от окружающего воздуха, во избежание ее загрязнения, отверстие фланца может быть затянуто тонкой нейлоновой пленкой. На фланец надевается ста-



Фиг. 1

кан, не показанный на фигуре, окружающий фокальную область и снабженный двумя окнами, закрытыми плоско-параллельными стеклянными пластинками для обеспечения возможности визуального и фотографического наблюдения процессов, происходящих в фокальной области.

Излучающая алюминиевая оболочка возбуждается кварцевыми пьезоэлектрическими пластинками X-среза, диаметром 40 мм, расположенными в количестве 200 штук равномерно по наружной поверхности. Все кварцевые пластины 2 отшлифованы сферически в соответствии с радиусом кривизны наружной поверхности алюминиевой оболочки, к которой они плотно притираются на масле и затем прижимаются при помощи накладок 9 и болтов 11. Болты, в свою очередь, поддерживаются швеллером 8, являющимся одновременно и токонесущим фидером. Все швеллеры соединены между собой электрически и питаются от мощного генератора через



Фиг. 2

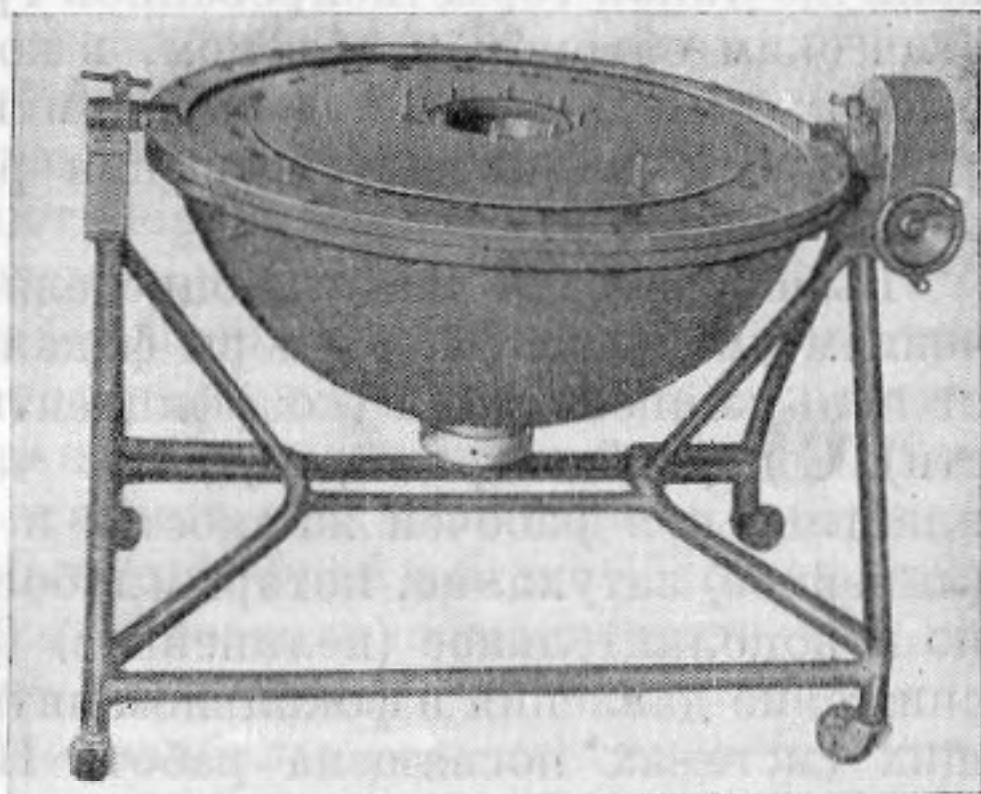
проходной изолятор 10, находящийся в нижней части концентратора. Пространство 4, в котором размещены все детали, находящиеся под высоким напряжением, заполнено электроизоляционным маслом.

Для увеличения амплитуды колебания кварцевых пластин между задними их сторонами и поверхностями накладок 9 созданы воздушные подушки толщиной 0,2—0,3 мм, образованные свинцовыми бортиками 3 на передней стороне накладки 9. Эти бортики видны на фиг. 2, на которой показаны с двух сторон кварцевая пластинка и накладка, а также прижимной болт. Свинцовые бортики, частично раздавливаясь при прижиме, создают необходимую герметизацию воздушной подушки.

Для устранения электрического пробоя или перекрытия по торцу кварцевой пластины последняя серебрится с наружной стороны не по всей поверхности, а лишь до диаметра 30 мм; таким образом, расстояние между электродами 11 мм (6 мм толщина пластинки и 5 мм чистый край). Электрическая часть концентратора рассчитана на рабочее напряжение 6—7 кВ.

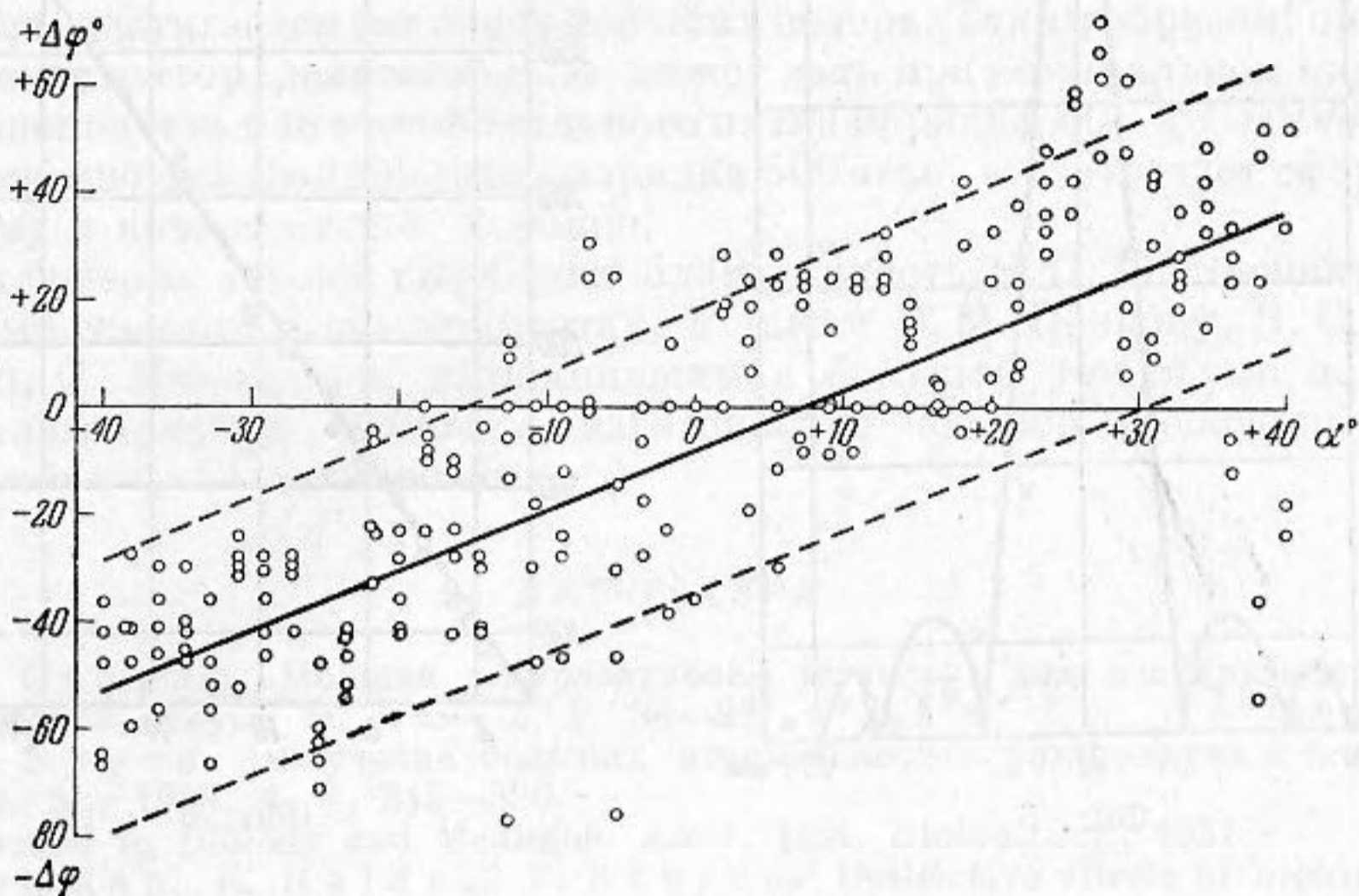
Хотя механические и диэлектрические потери в колебательной системе относительно невелики (к.п.д. подобных систем бывает 70÷80%), все же, вследствие большой подводимой мощности, они могут достигать несколько киловатт. Поэтому, кроме естественного охлаждения маслом, омывающим кварцевые пластины и алюминиевую полусферу, которая охлаждается еще и с внутренней стороны рабочей жидкостью, предусмотрено принудительное охлаждение проточной водой, циркулирующей в пространстве 7 (фиг. 1) между двойными стенками кожуха концентратора.

Общий вид концентратора, смонтированного на тележке, показан на фиг. 3. Через отверстие во фланце (стакан снят) видна внутренняя поверхность алюминиевой полусферы. Внизу виден проходной изолятор.



Фиг. 3

После пробной сборки были проведены предварительные испытания концентратора. При проведении этих испытаний было поставлено 160 кварцевых пластин, что соответствует углу раскрытия $\alpha_m \simeq 60^\circ$. В качестве электроизоляционной среды применялась кремнийорганическая жидкость «Калория-2», обладающая при высокой электрической прочности очень малым углом диэлектрических потерь и меньше окисляющаяся при соприкосновении с воздухом, чем трансформаторное масло. В качестве рабочей жидкости была применена хорошо обезгаженная вода; дегазирование производилось, как обычно, путем фонтанирования в вакууме. В процессе предварительных испытаний электрическое напряжение, подаваемое на кварцевые пластины, не превышало 4 кв, что приблизительно



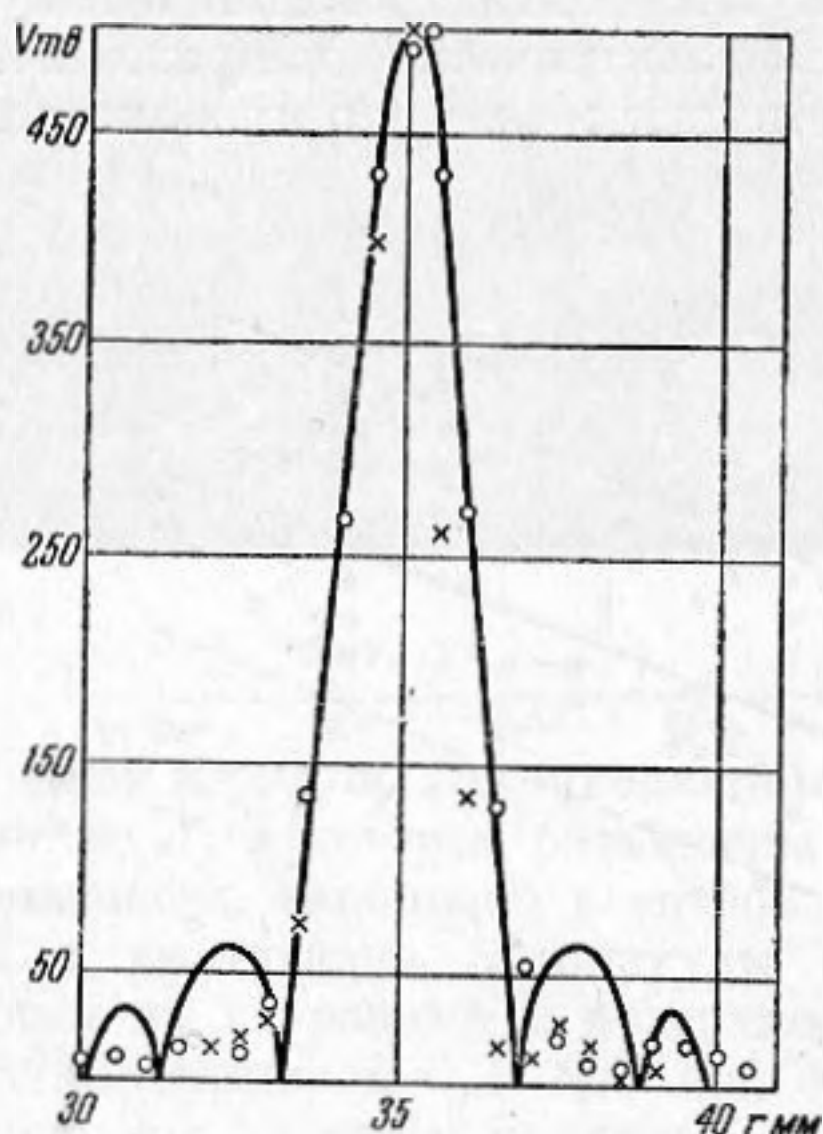
Фиг. 4

соответствует 60% от расчетного рабочего напряжения. Концентратор питался от высокочастотного генератора мощностью 8 квт, выходной каскад которого собран на лампе ГКО-10 с водяным охлаждением.

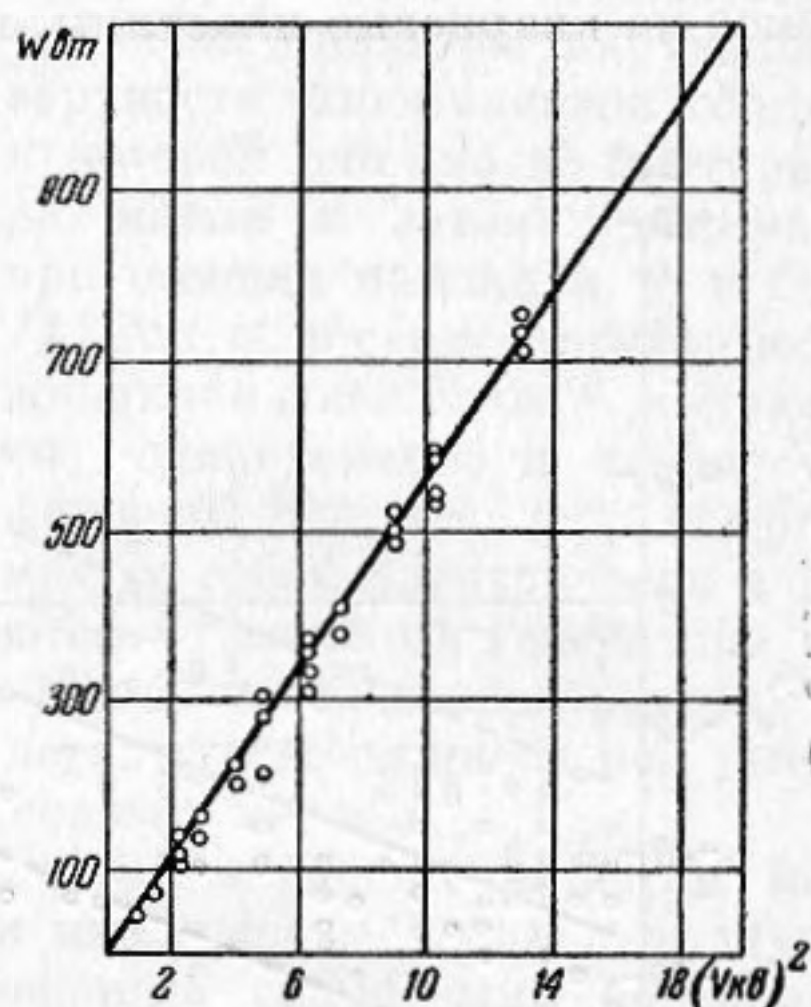
Так как эффективность действия концентратора определяется его фокусирующими свойствами, которые в первую очередь зависят от фазовой aberrации, прежде всего было проведено исследование распределения фазы по поверхности сферической пластины. Это измерение производилось при помощи миниатюрного приемника из керамики титаната бария [10] диаметром 0,3 мм, который при помощи специального устройства перемещался вдоль внутренней поверхности алюминиевой оболочки на расстоянии $\simeq 1$ мм от нее. Выходное напряжение приемника после усиления подавалось на вход фазометра; в качестве опорной фазы было взято напряжение, которым питались кварцевые пластины. Погрешность при этих измерениях может быть оценена в $\pm 15^\circ$. На фиг. 4 приведены результаты измерений вдоль одной из больших окружностей сферы. По оси абсцисс отложена угловая координата α в градусах; $\alpha = 0$ соответствует центральной точке сферической оболочки. По оси ординат — отклонение фазы $\Delta\varphi$ от значения при $\alpha = 0$. Из фигуры видно, что разброс большинства точек хорошо укладывается в полосу шириной $\pm 25^\circ$, т. е. практически лежит в пределах ошибки измерения. Средняя линия полосы представляет собой прямую с углом наклона $\Delta\varphi/\Delta\alpha = 1,25$, что соответствует линейному набегу фазы от одного края рабочего участка оболочки к другому в пределах $\pm 50^\circ$. Такой набег может происходить как вследствие малого систематического изменения толщины алюминиевой оболочки от

одного края к другому, так и в результате возможной небольшой систематической ошибки при перемещении измерительного щупа (0,3 мм в крайнем положении при длине штанги 314 мм).

Существенным, однако, является то обстоятельство, что линейная фазовая aberrация не влияет на форму фокального пятна, а вызывает лишь его незначительное смещение в фокальной плоскости (на те же 0,3 мм), статистическая же фазовая aberrация начинает существенно сказываться на структуре фокального пятна лишь в том случае, если флюкту-



Фиг. 5



Фиг. 6

ации фазы достигают 90° . Измерение распределения амплитуд показало, что они колеблются в пределах $\pm 15\%$ от среднего значения. Таким образом, исследование фазовой структуры волнового фронта свидетельствует о том, что основная идея построения концентратора — применение в качестве излучателя полуволновой сферической пластины, выполненной из пьезоэлектрического материала и возбуждаемой с внешней стороны пьезоэлектрической мозаикой, — вполне себя оправдала.

Следующим этапом было исследование распределения давления в фокальном пятне. Это исследование производилось как при помощи того же миниатюрного щупа из керамики титаната бария, так и при помощи специально сконструированного Ю. Я. Борисовым волноводного щупа по типу описанного Копельманом [11]. Для прецизионного перемещения щупа с точностью до 0,01 мм было применено координатное устройство, описанное Каневским [12]. На фиг. 5 сплошной линией показано теоретическое распределение давления в фокальном пятне (рассчитано методом, изложенным в [6]), кружками и крестиками — экспериментальные точки, относящиеся к двум взаимно перпендикулярным плоскостям. Видно, что в пределах главного максимума экспериментальное распределение очень хорошо согласуется с расчетным, чего, впрочем, и можно было ожидать, учитывая малость фазовой aberrации волнового фронта. Радиус фокального пятна получился равным $r_f = 1,95$ мм, а его площадь $S_f = 0,12$ см².

Наконец, были проведены измерения полного потока энергии сходящегося волнового фронта вблизи фокуса и было, таким образом, учтено как линейное, так и нелинейное поглощение при распространении звука в воде. Измерения производились радиометром с коническим самоцентрирующимся поршнем. Результаты этих измерений показаны на фиг. 6, где по оси абсцисс отложен квадрат напряжения на кварцевых пластинах, а по оси ординат — поток энергии фронта в ваттах. Результаты хорошо укла-

дываются на прямую линию и свидетельствуют о том, что при напряжении, равном половине расчетного $-3,6 \cdot 10^3$ в, поток энергии составляет 725 вт, что дает для средней интенсивности в фокальном пятне 6000 вт/см². Для интенсивности же в центре фокального пятна (к которой относились данные авторов, приведенных выше), получается величина порядка $18-20 \cdot 10^3$ вт/см².

Конечно, вследствие нелинейного поглощения нет уверенности, что при доведении питающего напряжения до номинала (7 кв) эти цифры учетверятся. Но подсчет, сделанный на основании [8] для описанного концентратора, показывает, что предельная колебательная скорость, которая может быть достигнута в центре фокального пятна, имеет порядок 7000 см/сек, что соответствует пику давления 1000 атм. Давление, равное или меньшее 70% этого предела, достигается без очень больших потерь. Таким образом, описываемый концентратор действительно может дать при номинальном напряжении интенсивность в центре фокального пятна порядка $60-70 \cdot 10^3$ вт/см² и соответственно пиковое давление порядка 500 атм, что отвечает сформулированному в начале статьи заданию.

В заключение авторы выражают благодарность В. П. Шестерневу, принимавшему участие в экспериментах, а также В. М. Певцову, В. С. Качанову и В. С. Михайлову, выполнившим с большой точностью полуволновую алюминиевую оболочку, изготовление которой требовало разработки специальной технологии.

ЛИТЕРАТУРА

1. И. В. Скардс. Мощная ультразвуковая установка для озвучивания микроорганизмов. Акуст. ж., 1956, 2, 1, 84—92.
2. А. К. Буров. Получение больших интенсивностей ультразвука в жидкости. Акуст. ж., 1958, 4, 4, 315—320.
3. Ultrasound in Biology and Medicine. Amer. Inst. Biolog. Sci., 1957.
4. J. Lehman, E. Baldes, F. Krusen. Destructive effects of highintensity ultrasound on plant tissues. См. [3], pp. 177—190.
5. W. Fry, F. Fry. Neurosonicsurgery. См. [3], pp. 99—109.
6. Л. Д. Розенберг. О концентраторах ультразвука. Тр. Комис. по акустике, 1955, 8, 102—113.
7. A. Williams. Electroacoustic device (Patent USA № 2, 632, 634, 23 Sept. 1950). J. Acoust. Soc. America, 1953, 25, 6, 1220.
8. К. А. Наугольных. О поглощении звуковых волн конечной амплитуды. Обзор. Акуст. ж., 1958, 4, 2, 115—124.
9. К. А. Наугольных, Е. В. Романенко. О зависимости коэффициента усиления фокусирующей системы от интенсивности звука. Акуст. ж., 1959, 5, 2, 77—81.
10. Е. В. Романенко. Миниатюрные пьезоэлектрические приемники ультразвука. Акуст. журн., 1957, 4, 3, 342—347.
11. J. Korrelman. Beiträge zur Ultraschallmesstechnik in Flüssigkeiten. Acustica, 1952, 2, 92—95.
12. И. Н. Каневский. Установка для измерения ультразвуковых полей в жидкости. Измерит. техника, 1959, 3.

Акустический институт АН СССР
Москва

Поступила в редакцию
13 февраля 1959 г.