

УДК 534.29:532.528

**О РОЛИ КАВИТАЦИИ В ПРОЦЕССЕ РАСПЫЛЕНИЯ ЖИДКОСТЕЙ
В УЛЬТРАЗВУКОВОМ ФОНТАНЕ***О. К. Экнадиосяни*

Экспериментально показано, что распыление жидкости в ультразвуковом фонтане может протекать только при условии образования кавитационной области в струе фонтана. Вся акустическая энергия, вошедшая в струю фонтана, расходуется в основном там, где наблюдается кавитация и происходит распыление жидкости. Подсчитано минимальное количество зародышей кавитации в 1 см^3 отстоявшейся дистиллированной воды, инициирующих образование импульсов тумановыделения.

Настоящая работа ставит своей задачей обосновать правильность гипотезы о кавитационной природе распыления жидкостей в ультразвуковом фонтане, выдвинутой еще в работах [1—3]. Ниже приводятся результаты экспериментов, на основании которых могут быть сделаны дополнительные суждения о роли кавитации в процессе ультразвукового распыления.

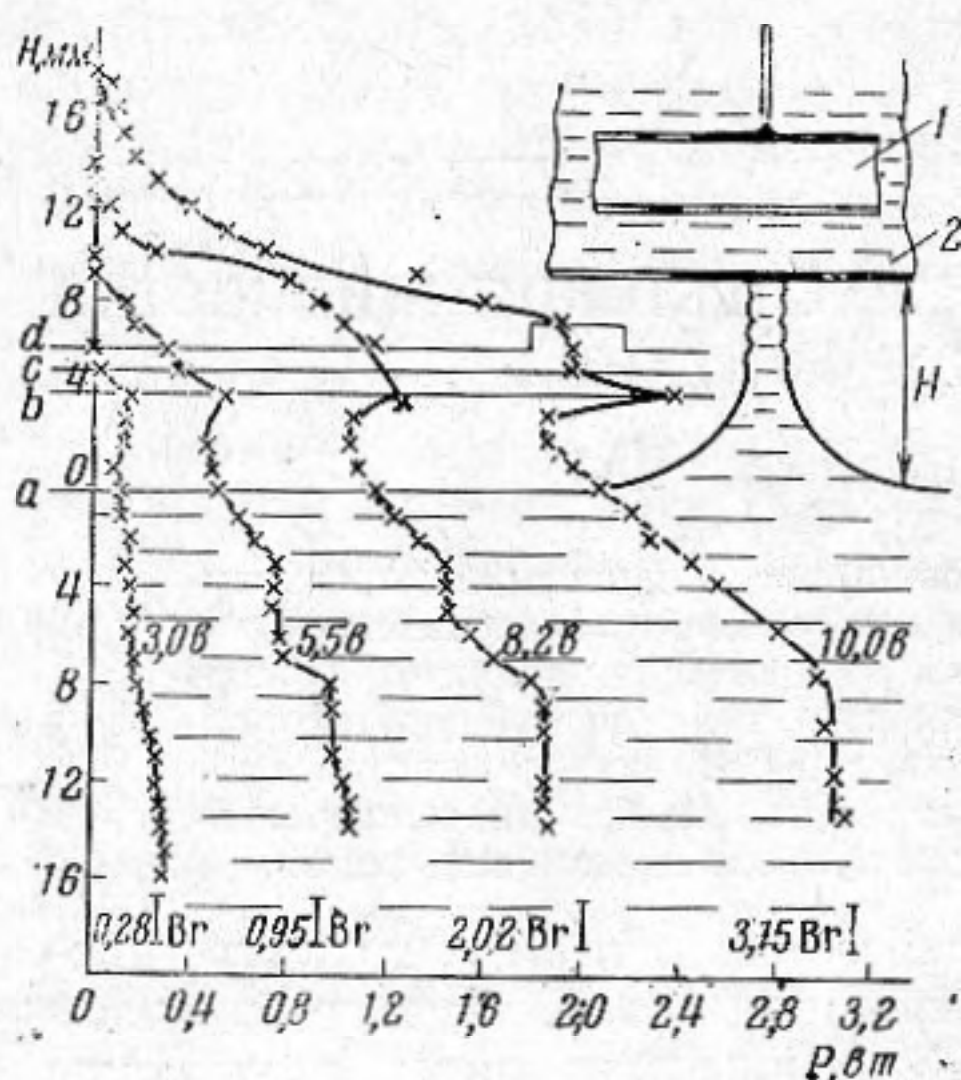
Как известно, наличие сонолюминесценции является достаточным доказательством присутствия кавитации в люминесцирующей области. Поэтому наблюдая сонолюминесценцию, возможно судить не только о существовании кавитации в процессе ультразвукового распыления, но и о местоположении кавитационной области. Поскольку характер распыления различных жидкостей в мегагерцевом диапазоне не зависит от частоты и от природы жидкости [2], достаточно ограничиться наблюдением в процессе распыления свечения одного-двух веществ. Нами были выбраны вода и глицерин, имеющие большую яркость свечения. Для фотографирования сонолюминесценции использовалась пленка типа РФ. Визуальным наблюдениям предшествовала соответствующая подготовка, стимулирующая адаптацию глаза при сумеречном освещении. На фиг. 1 (а, г, д, см. вкл. — стр. 105) приведены фотоснимки сонолюминесценции в глицерине, полученные с выдержкой около 10 мин. В воде, несмотря на еще большие выдержки (до 30 мин), получить четкую фотографию свечения не удалось (фиг. 1, е). Поэтому, экспериментируя с водой, мы ограничились в основном визуальными наблюдениями.

Как известно, в результате поглощения происходит интенсивное нагревание глицерина в ультразвуковом поле. До тех пор, пока глицерин не нагрелся, струя фонтана прозрачна и имеет цилиндрическую форму (фиг. 1, б). Яркая сонолюминесценция наблюдается только у основания фонтана (свечение первого типа), т. е. в фокальной зоне излучателя (фиг. 1, а). После длительного озвучивания глицерина, когда его температура начинает превышать некоторое, по-видимому, пороговое значение, свечение скачком перемещается в струю (свечение второго типа). Область свечения при этом значительно увеличивается (фиг. 1, г), поверхность струи становится шероховатой, матовой при ее освещении (фиг. 1, е), скорость течения жидкости в струе существенно возрастает. При дальнейшем повышении температуры начинается распыление с матовой поверхности струи ультразвукового фонтана. Переход от свечения первого типа к свечению второго типа происходит через некоторое промежуточное неустойчивое состояние, при котором наблюдаются кратковременные вспышки — выбросы свечения из основания фонтана в струю. С увеличением темпера-

туры частота этих выбросов свечения увеличивается и затем устанавливается свечение второго типа. На фиг. 1, *д* в результате длительной экспозиции оба типа свечения совмещены на одном фотоснимке, что позволяет судить об их относительном расположении.

В воде, как правило, наблюдалось только свечение второго типа (фиг. 1, *е*), сопровождавшееся интенсивным выделением тумана, затруднявшим наблюдение сонолюминесценции. Свечение первого типа в воде можно было наблюдать лишь при небольшой расстройке частоты питающего напряжения. При этом струя фонтана утолщалась, становилась прозрачной, тумановыделения не было. Таким образом, распыление в ультразвуковом фонтане может протекать только при условии образования кавитационной области в самой струе фонтана.

Мы исследовали также распределение потока звуковой энергии в ультразвуковом фонтане методом радиометра*. Приемник радиометра 1



Фиг. 2

(фиг. 2) помещался в цилиндре с дном из звукопроницаемой пленки 2, отсекающей звуковой ветер. Цилиндр и сосуд с керамическим фокусирующим излучателем, имеющим собственную частоту 2 Мгц, заполнялись отстоявшейся дистиллированной водой. В начальном положении стакан с приемником радиометра был расположен так, что его дно было ниже уровня жидкости *a* в сосуде и приемник перехватывал весь поток звуковой энергии. Затем сосуд с излучателем перемещался вниз. Измерение радиационного давления производилось при помощи торсионных весов, показания которых пересчитывались в величины потока звуковой энергии *P*. Результаты этих измерений представлены кривыми (фиг. 2), соответствующими четырем значениям напряжения на излучателе. На графике внизу приведены также значения мощности, отдаваемой излучателем, рассчитанные по известной формуле $P = kU^2f^2S$, где *U* — напряжение на излучателе, *f* — частота ультразвука, *S* — площадь рабочей поверхности излучателя, *k* — коэффициент, зависящий от типа излучателя.

При постепенном опускании сосуда с излучателем жидкость вследствие капиллярных явлений тянется вслед за цилиндром, приподымаясь по всему его сечению несколько выше уровня свободной поверхности *a*. Затем, начиная с некоторого уровня *c*, жидкость обрывается и образуется фонтан, схематически изображенный на фиг. 2. Буквой *d* отмечена нижняя граница области распыления.

Для лучшего изложения результатов этих опытов нужно рассматривать их совместно с результатами наблюдения сонолюминесценции.

Последнее показывает, что кавитация в ультразвуковом фонтане может существовать только в двух взаимоисключающих положениях: либо в фокальной области излучателя, расположенной у основания фонтана, либо в струе.

Провал кривых в районе фокальной области излучателя обусловлен расходом звуковой энергии на кавитацию и связанное с ней возникновение звукового ветра [4], отсекаемого звукопроницаемой пленкой. Звукопроницаемая пленка, по-видимому, интенсифицирует протекание кавитации

* В проведении эксперимента принимал участие О. Н. Шумилов.

вблизи нее (были видны следы эрозии) и инициирует ее возникновение при уровнях энергии, несколько меньших пороговых. С выведением пленки из области кавитации в фокальной зоне излучателя интенсивность протекания кавитации несколько уменьшается, в результате чего поток звуковой энергии заметно возрастает (уровень b).

С образованием струи (уровень c) поток звуковой энергии P скачком снижается до некоторого значения P_c . Этот спад вызван отражением звука при переходе из полупространства в естественный волновод, образованный струей. На участке струи от c до d , на котором распыление еще не происходит, уменьшение потока звуковой энергии незначительно. Быстрое убывание потока звуковой энергии начинается с ординаты d — нижней границы области распыления. Тумановыделение наблюдается на всем участке от d до ординаты точки пересечения кривых с осью H , причем максимум интенсивности тумановыделения соответствует участку наиболее крутого спада кривых распределения.

На основании результатов наблюдения сонолюминесценции можно заключить, что с появлением струи, с поверхности которой происходит распыление жидкости, область кавитации перемещается в струю. Сравнение кривых фиг. 2 с фотографиями фиг. 1 показывает, что местоположения нижних границ зоны сонолюминесценции (свечение 2-го типа) и области распыления струи, а также точки, с которой начинается быстрое убывание потока звуковой энергии в струе, приблизительно совпадают. На том участке струи, где нет кавитации и не происходит распыления (между уровнями c и d , фиг. 2), практически отсутствует и убывание потока звуковой энергии. Таким образом, вся акустическая энергия, вошедшая в струю P_c , расходуется в основном на рабочем участке струи ультразвукового фонтана, т. е. там, где наблюдается кавитация и происходит распыление жидкости.

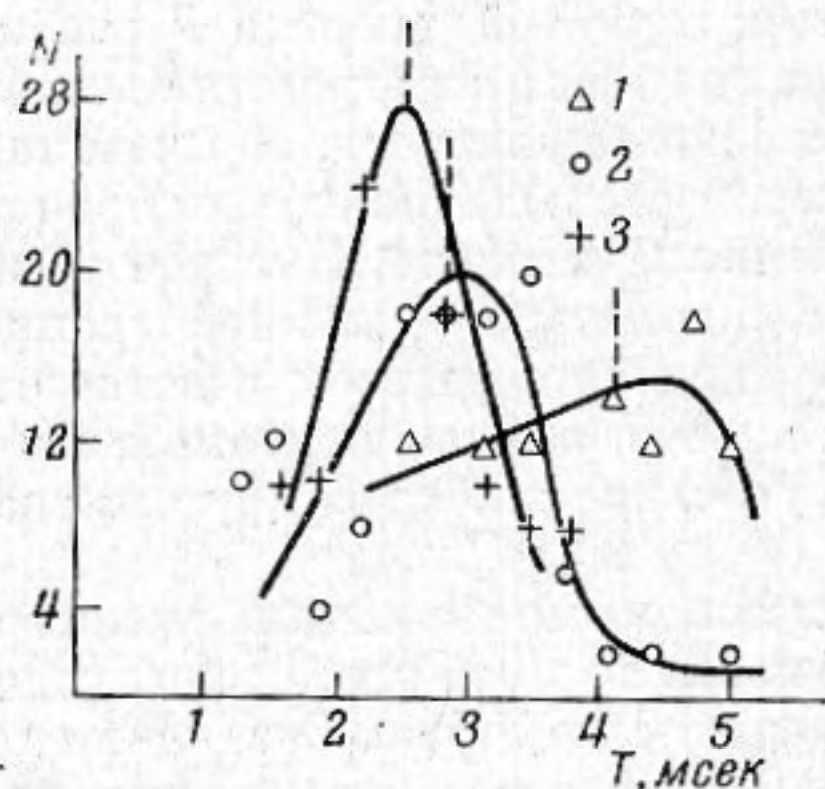
Зная диаметр капель аэрозоля [5] и производительность ультразвукового распыления [1], можно найти количество энергии P' , расходуемой на образование новой поверхности при возникновении капель аэрозоля в течение 1 сек. Из того, что это количество энергии P' составляет десятые доли процента от P_c , можно заключить, что практически вся акустическая энергия, вошедшая в струю P_c , расходуется на кавитацию в струе ультразвуко-

Напряжение $U, \text{ в}$	Область распыления $H, \text{ мм}$	Скорость жидкости в струе $V, \text{ м/сек}$	Диаметр струи $D^*, \text{ мм}$	Мощность излучения $P, \text{ вт}$	P_c/P	Режим распыления
3,0	1	1,2	0,8/0,5	0,3		Вблизи порога распыления
5,5	4	1,6	0,8/0,5	1,0	0,34	
8,2	8	—	—	1,9	0,64	Режим большой мощности
10,0	12	—	2,7	3,1	0,65	

* В том случае, когда вблизи порога распыления струя составлена из бусинок [2], производится два значения диаметра D/D_1 .

вого фонтана, а также на тепловые потери. Заметим, что с переходом от распыления в импульсном режиме (при напряжениях, значительно превышающих пороговое [2]) к распылению в режиме большой мощности, приблизительно вдвое увеличивается та часть потока звуковой энергии P_c , которая входит в струю и затем расходуется на ее рабочем участке (см. таблицу). По аналогии с коэффициентом эрозионной эффективности звука $\eta_{\text{эра}}$ [6] можно ввести коэффициент эффективности диспергирования звуком $\eta_{\text{дис}}$, представив его (так же как и $\eta_{\text{эра}}$) в виде произведения двух независимых величин: $\eta_{\text{дис}} = \kappa \gamma$. Здесь κ — коэффициент кавитационного использования акустической энергии, γ — коэффициент эффективности диспергирования кавитацией, равный отношению энергии P' к акустиче-

ской энергии P_c . Результаты наших экспериментов позволяют оценить величины $\eta_{\text{дис}}$, κ и γ при распылении жидкости в ультразвуковом фонтане. При распылении в режиме большой мощности $\kappa = 0,65$, т. е. довольно велика. Что же касается величин γ , а следовательно и $\eta_{\text{дис}}$, то они имеют значения порядка нескольких тысячных.



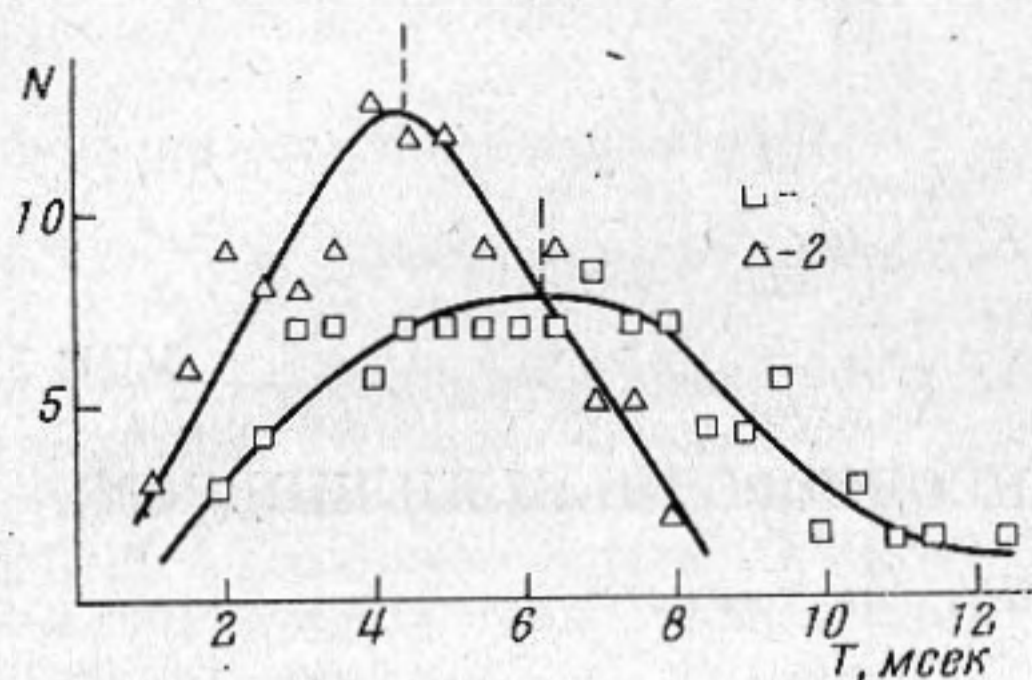
Фиг. 3

Эксперименты с сонолюминесценцией и исследование закона распределения потока звуковой энергии в сочетании с другими уже опубликованными результатами [1—3] вновь приводят к заключению, что кавитации принадлежит активная роль в процессе распыления жидкостей в ультразвуковом фонтане. Напомним, что дегазация и повышенное статическое давление, затрудняющие образование кавитации, подобным же образом снижают интенсивность туманообразования и повышают соответственное пороговое значение амплитуды звукового давления (или напряжения на излучателе) [2]. Тот факт, что при небольших мощностях ультразвука циклы процессов распыления следуют друг за другом почти периодически [5], также хорошо согласуется с предположением о том, что причиной возникновения распыления является кавитация. Действительно, для возникновения кавитации в струе необходимо появление в ней, по крайней мере, одного пузырька, способного в данных условиях быть зародышем кавитации. За несколько периодов зародыш может превратиться в область кавитации [7], вызывающую распыление жидкости в струе ультразвукового фонтана. Область кавитации перемещается потоком жидкости в верхние участки струи и затем там исчезает вследствие дефицита акустической энергии и разрушения струи [8]. Возникновение следующего цикла распыления обуславливается появлением нового зародыша кавитации. В этом случае каждый импульс распыления является сигналом о появлении в струе, по крайней мере, одного нового зародыша кавитации, а частота импульсов распыления ν есть в то же время минимальная частота появления зародыша кавитации в струе ультразвукового фонтана. На фиг. 3, где значки 1, 2, 3 относятся соответственно к напряжениям на излучателе 2, 3 и 4е, приведены кривые распределения промежутков времени между импульсами распыления T ($T = 1/\nu$) в отстоявшейся дистиллированной воде при напряжениях на излучателе, незначительно превосходящих значение порога распыления. Пунктиром отмечены среднеарифметические значения этих промежутков $T_{\text{ср}}$, используемые для характеристики интенсивности протекания распыления вблизи его порога [2, 3]. С увеличением напряжения кривые сдвигаются в сторону меньших T и принимают вид кривых нормального закона с малой дисперсией, т. е. процесс становится почти периодическим. Такая эволюция кривых распределения с ростом напряжения связана с возрастанием числа пузырьков в струе, способных быть зародышами кавитации.

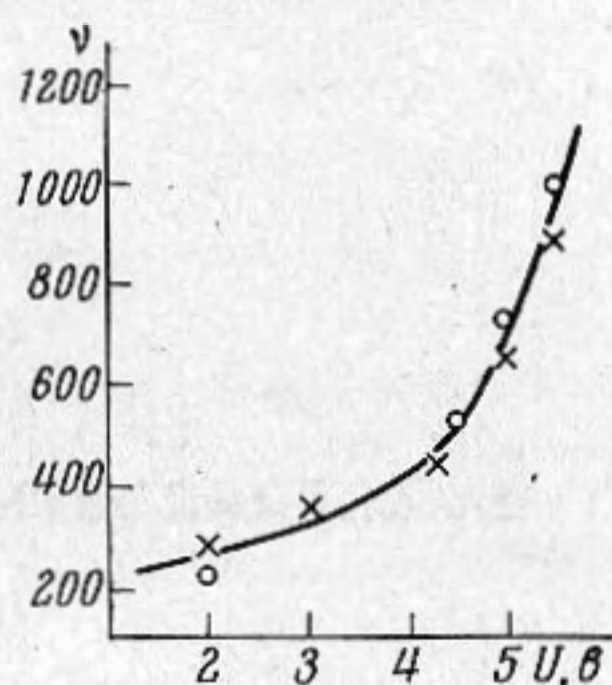
Нами были проведены также эксперименты с использованием другой жидкости — тетралина*. В результате дегазации тетралина также происходит смещение кривых в сторону больших значений T и расширение их, связанное с большим разбросом в чередовании сравнительно редких событий (фиг. 4, где значки 1 и 2 соответствуют случаям дегазированного и недегазированного тетралина). На фиг. 5 приведена экспериментальная кривая зависимости частоты импульсов распыления в отстоявшейся дистиллированной воде от напряжения U на излучателе, незначительно превосхо-

* В проведении эксперимента принимал участие Б. И. Ильин.

дующего пороговое. Кружками помечены значения частоты импульсов распыления ν_b , соответствующие максимумам кривых распределения промежутков между импульсами, крестиками — среднеарифметические значения частоты ν_{cp} . Зная ν , с помощью приведенной выше таблицы возможно



Фиг. 4



Фиг. 5

найти минимальное количество зародышей кавитации в 1 см^3 жидкости струи при напряжениях на излучателе, незначительно превышающих пороговое. При $U = 5,5 \text{ в}$, $\nu_{cp} = 890 \text{ имп/сек}$ (фиг. 5), а, зная скорость течения жидкости в струе и среднюю площадь ее сечения, возможно найти количество жидкости, выброшенной ультразвуковым фонтаном за 1 сек . Произведя несложные расчеты, получим количество зародышей кавитации в 1 см^3 отстоявшейся дистиллированной воды, приблизительно равное 1400. Воспользовавшись известным выражением $p = \sqrt{I \cdot 2\rho c}$, где p — амплитуда звукового давления, I — интенсивность звука, ρc — волновое сопротивление среды, на основании экспериментальных результатов, приведенных в таблице, найдем, что при $U = 5,5 \text{ в}$ амплитуда звукового давления у основания струи ультразвукового фонтана $p = 16 \text{ атм}$. Найденное таким способом число зародышей кавитации в 1 см^3 воды приблизительно в 350 раз превышает соответственное значение, приведенное в работе [9]. Возможным объяснением такому расхождению является неодинаковость условий эксперимента, в которых проводились эти измерения. В работе [9] исследуемый объем жидкости находился в фокальной области фокусирующего излучателя и был окружен со всех сторон жидкостью. В наших опытах исследуемый объем жидкости — участок струи фонтана, соприкасался своими стенками с воздухом и, кроме того, жидкость, перед тем как попасть в этот объем, проходила предварительно через фокальную область фокусирующего излучателя.

В заключение автор выражает благодарность Л. Д. Розенбергу за ряд ценных советов и замечаний.

ЛИТЕРАТУРА

1. Э. Л. Гершензон, О. К. Экнадиосянц. О природе распыления жидкости в ультразвуковом фонтане. Акуст. ж., 1964, 10, 2, 156—162.
2. Б. И. Ильин, О. К. Экнадиосянц. К вопросу о природе распыления жидкости в ультразвуковом фонтане. Акуст. ж., 1966, 12, 3, 310—318.
3. P. I. Ilyin, O. K. Eknadiosyants. On the Nature of ultrasonic fountain fog formation. 5 Congres International d'Acoustique. Liege, 1965, D 47.
4. М. Г. Сиротюк. Баланс энергии звукового поля при наличии кавитации. Акуст. ж., 1964, 10, 4, 393—397.
5. Л. Д. Розенберг, О. К. Экнадиосянц. О кинетике ультразвукового туманообразования. Акуст. ж., 1960, 6, 3, 370—373.
6. Л. Д. Розенберг. Об оценке кавитационной эффективности акустической энергии. Акуст. ж., 1965, 11, 1, 121—124.
7. М. Г. Сиротюк. Экспериментальное исследование процесса развития ультразвуковой кавитации на частоте 500 кГц. Акуст. ж., 1962, 8, 2, 216—219.
8. О. К. Экнадиосянц. О кинетике ультразвукового туманообразования. Акуст. ж., 1963, 9, 2, 247—248.
9. М. Г. Сиротюк. Кавитационная прочность воды и распределение в ней зародышей кавитации. Акуст. ж., 1965, 11, 3, 380—386.

Акустический институт АН СССР
Москва

Поступила в редакцию
22 мая 1966 г.