АКУСТИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

Том XV 1969 Вып. 1

УДК 534.29

О ФИЗИЧЕСКОМ МЕХАНИЗМЕ РАСПЫЛЕНИЯ ЖИДКОСТИ АКУСТИЧЕСКИМИ КОЛЕБАНИЯМИ

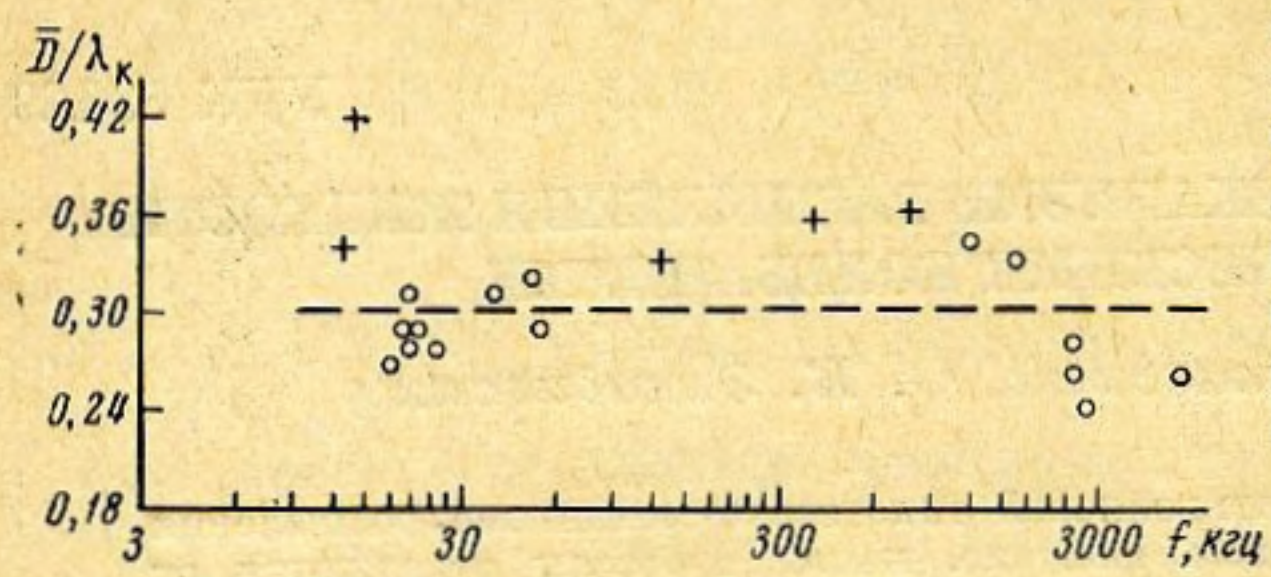
Ю. Я. Богуславский, О. К. Экнадиосянц

Согласно кавитационно-волновой гипотезе о механизме распыления жидкости в ультразвуковом фонтане, капли аэрозоля отделяются от гребней капиллярных волн конечной амплитуды на поверхности струи фонтана. Капиллярные волны возникают под действием периодических ударных волн, генерируемых кавитационными пузырьками внутри струи. Приведены экспериментальные доказательства правомерности данной гипотезы и приблизительный расчет параметров фронта ударной волны, образованной кавитацией в струе фонтана.

В 1927 году Вудом и Лумисом [1] было открыто и описано явление распыления жидкости высокочастотными ультразвуковыми колебаниями в фонтане и лишь спустя приблизительно четверть века было показано, что воздействие низкочастотных ультразвуковых и даже низкочастотных звуковых колебаний также может привести к аналогичному эффекту. В результате первого качественного исследования распыления различных жидкостей в фонтане Зольнер выдвинул так называемую кавитационную гипотезу [2]. В соответствии с этой гипотезой * жидкость распыляется гидравлическими ударами, возникающими при захлопывании кавитационных пузырьков вблизи ее поверхности. Никакого более детального описания самого механизма каплеобразования в предложенной Зольнером гипотезе не содержалось. Сторонниками кавитационного механизма распыления являются также Штрейбль [3] и Кекк [4], однако сами они не приводят каких-либо существенных доводов в ее пользу. Другая, так называемая капиллярно-волновая гипотеза была предложена Биза, Дирнаглем и Эше [5] также в результате исследования процесса распыления жидкости в фонтане. В соответствии с этой гипотезой капли аэрозоля отделяются от гребней стоячих капиллярных волн конечной амплитуды, образующихся на поверхности распыляемой жидкости. Крауфорд [6], впервые осуществивший распыление жидкости в слое, покрывающем поверхность пакетного магнитострикционного преобразователя, полагал, что капли аэрозоля образуются в результате неравномерности толчков, создаваемых отдельными колеблющимися пластинами пакета. На основании анализа экспериментальных результатов, полученных при исследовании образования аэрозоля при акустическом распылении жидкости, ряд исследователей и прежде всего Штамм, Польман [7, 8] и Ланг [9] пришли к заключению, что распыление жидкости в слое происходит в соответствии с капиллярно-волновой гипотезой, предложенной для объяснения механизма распыления жидкости в фонтане. В настоящее время капиллярно-волновая гипотеза является общепринятой гипотезой о распылении жидкости при подведении акустической энергии к зоне распыления через жидкость. Кавитации отводится роль сопутствующего и мешающего распылению явления.

* В дальнейшем кавитационной мы будем называть любую гипотезу, в соответствии с которой распыление связано с возникновением кавитации в области распыления.

В соответствии с капиллярно-волновой гипотезой образование капель самым тесным образом связано с возникновением на поверхности жидкости капиллярных или капиллярно-гравитационных волн. Задача нахождения механизма параметрического возбуждения таких волн и условий их возникновения решена Сорокиным [10] и независимо от него Эйзенменгером [11]. Пороговое значение амплитуды $A_п$ возбуждающих колебаний, необходимое для возникновения капиллярных волн на поверхности жидкости, определяется выражением $A_п = 4\nu / f\lambda_к$. Здесь ν — коэффициент кинематической вязкости жидкости, f — частота возбуждающих колебаний $\lambda_к = \sqrt[3]{8\pi\sigma / \rho f^2}$, где σ и ρ — коэффициент поверхностного натяжения и плотность жидкости соответственно.



Фиг. 1

В соответствии с полученным решением даже при незначительном превышении амплитудой колебания A порогового значения $A_п$ должно происходить экспоненциальное нарастание амплитуды капиллярных волн, заканчивающееся разрушением гребней вследствие их неустойчивости, с образованием капель жидкости. На самом деле образование капель происходит при значительно бóльших значениях амплитуды колебаний. Так, например, в области инфразвуковых частот капли начинают отделяться при $A > kA_п$, где $k = 7 \div 8$ [10]. В области ультразвуковых частот от 10 *кгц* до 1,5 *Мгц* капли начинают отделяться уже при $k = 4$ [11]. В таблицу сведены все известные нам результаты измерений среднего диаметра капель аэрозоля, образующегося при распылении различных жидкостей в слое и в ультразвуковом фонтане. Из этой таблицы видно, что между средним диаметром капель аэрозоля $\bar{D}$ и длиной капиллярных волн $\lambda_к$ действительно существует постоянное соотношение $\bar{D} = \alpha\lambda_к$, где α не зависит ни от частоты акустических колебаний, ни от природы жидкости, ни от способа акустического распыления. По данным таблицы на фиг. 1 в полулогарифмической системе координат $\bar{D} / \lambda_к$ и f нанесены точки, которые неплохо ложатся на прямую, параллельную оси f. Кружки на этом графике соответствуют наиболее часто встречающимся диаметрам $D_в$, крестики — численно-медианным диаметрам $D_{ч.м.}$ капель аэрозоля.

Сравнение кривых распределения относительных диаметров $D / D_в$ [15] также говорит о едином капиллярно-волновом механизме образования капель аэрозоля под действием акустических колебаний, распространяющихся в жидкости. Как при распылении слоя жидкости низкочастотными ультразвуковыми колебаниями, так и при распылении жидкости в фонтане, относительный диаметр $D / D_в$ капель аэрозоля изменяется в одних и тех же пределах: приблизительно от 0,3 до 3,0. Кривые распределения $D / D_в$, построенные на основании экспериментальных результатов Экнадиосянца [16], приблизительно симметричны относительно своего максимума ($D / D_в$ изменяется в пределах от 0,3 до 1,7), что объясняется более тщательным подавлением акустической коагуляции в его экспериментах.

Несмотря на убедительность приведенных доводов в пользу капиллярно-волновой гипотезы акустического распыления жидкости, она все же не может объяснить все экспериментально наблюдаемые факты. Вполне удовлетворительно эта гипотеза объясняет закономерности распыления слоя жидкости низкочастотными ультразвуковыми колебаниями. Скоростная киносъемка показала [16], что образование капель аэрозоля при распылении жидкости в слое происходит в полном соответствии с капиллярно-

Жидкость				Метод измерения диаметра частиц	Способ распыления	f, *кгц*	$\lambda_к$, *мк*	$\overline{D}$, *мк*		$\overline{D}/\lambda_к$		Источник	Примечания
наименование	t, °C	ρ, *г/см³*	σ, *дн/см*					$D_в$	$D_{ч.\ м.}$	$\frac{D_в}{\lambda_к}$	$\frac{D_{ч.\ м.}}{\lambda_к}$		
Парафин	172	0,82	21,7	Ситовый анализ		13,0	157,9				0,34	[9]	
»	172	0,82	21,7	» »		14,0	150,4		63		0,42	[12]	У автора $\lambda_к = 147,0$ $D_{ч.\ м.}/\lambda_к = 0,43$
Вода	20	1,0	72,8	Микрофотографирование; подложка жидкая	Распыление в слое	18,5	175,9	48,2		0,27		[13]	
»	20	1,0	72,8	То же		21,0	161,7	46,0		0,28		[8]	У авторов $D_в/\lambda_к = 0,25$
Ртуть	20	13,5	474	Микроскопический		21,0	126,0	37,0		0,29		[8]	То же
Свинец	Расплав			»		21,0				0,29		[8]	»
Олово	»			»		21,0				0,31		[8]	»
Вода	20	1,0	72,8	Микрофотографирование; подложка жидкая		25,5	142,0	40,3		0,28		[13]	
»	20	1,0	72,8	То же		40,0	105,1	33,0		0,31		[8]	У авторов $D_в/\lambda_к = 0,25$
»	20	1,0	72,8	»		50,0	90,6	28,6		0,32		[13]	
»	20	1,0	72,8	»		53,0	87,2	25,0		0,29		[8]	У авторов $D_в/\lambda_к = 0,25$
Парафин	172	0,82	21,7	Ситовый анализ		130,0	34,0		11		0,34	[9]	У автора $D_в/\lambda_к = 0,33$
»	73,9	0,89	30				17,7				0,32	[12]	
	172	0,82	21,7	Микроскопический		390	16,4		6		0,34	[9]	У автора $D_в/\lambda_к = 0,38$
»	73,9	0,89	30	»		780	11,2				0,37	[12]	
							10,3		4		0,39	[9]	У автора $D_в/\lambda_к = 0,44$
Водный раствор NaCl (5%)	20	1,03	72,8	Седиментометрический		1200	10,7	3,6		0,34		[12]	
То же	20	1,03	72,8	»		1700	8,5	2,8		0,33		[5]	
»	20	1,03	72,8	Не указан	Распыление в фонтане	2500	6,7	1,9		0,28		[5]	
»	40	1,03	69,6	»		2500	6,5	1,7		0,26		[14]	
»	20	1,03	72,8	Седиментометрический		2700	6,3	1,5		0,24		[14]	
»	20	1,03	72,8	»		5400	3,9	<1,0		<0,26		[5]	

волновой гипотезой. В то же время ряд экспериментов с распылением жидкости в фонтане, не согласуясь с этой гипотезой, говорит в пользу обобщенной кавитационной гипотезы акустического распыления жидкости. Такими, в частности, являются эксперименты с сонолюминесценцией и исследование закона распределения потока звуковой энергии в ультразвуковом фонтане. Эти эксперименты показали [17], что распыление жидкости в ультразвуковом фонтане имеет место только при условии образования кавитационной области в самой струе фонтана, а вся акустическая энергия, вошедшая в струю фонтана, расходуется в основном там, где наблюдается кавитация и происходит распыление жидкости. К аналогичному заключению привели также эксперименты с кавитационным разрушением фольги и с химической индикацией кавитации в ультразвуковом фонтане [18].

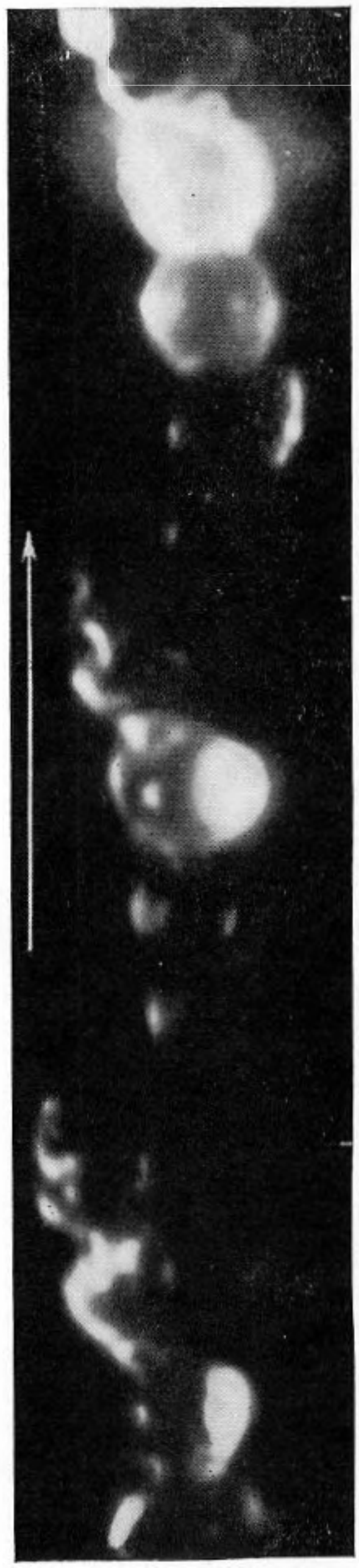
Наличие кавитации в струе фонтана, так же как и образование капиллярных волн на поверхности распыляемой жидкости, еще не является достаточно веским аргументом в пользу той или иной гипотезы. Необходимы эксперименты, которые показали бы, что кавитация управляет распылением, а не просто сопутствует этому процессу. Такие ключевые эксперименты показали, что дегазация и повышенное статическое давление угнетают, а вблизи порога и совсем прекращают образование аэрозоля в ультразвуковом фонтане [19]. В рамках капиллярно-волновой гипотезы акустического распыления жидкости результаты этих экспериментов не могут найти никакого разумного объяснения, так как повышение давления в пределах нескольких атмосфер, а тем более дегазация не могут заметно изменить такие физические свойства жидкости, как, например, давление насыщенных паров $p_н$, коэффициенты поверхностного натяжения σ и динамической вязкости η. Помимо уже приведенных соображений, в пользу кавитационной гипотезы говорит существование зависимости производительности распыления от величины давления насыщенных паров жидкости $p_н$ и сопоставление закономерностей акустического распыления жидкостей с закономерностями других явлений, кавитационная природа которых не вызывает никаких сомнений, например, с сонолюминесценцией и с кавитационной эрозией в ультразвуковых полях высокой интенсивности [18].

В свете всех приведенных экспериментальных данных можно сделать единственный вывод, что образование аэрозоля в фонтане происходит путем отрыва капель аэрозоля от гребней капиллярных волн конечной амплитуды на поверхности струи фонтана. В этой части предлагаемая нами кавитационно-волновая гипотеза совпадает с капиллярно-волновой. Существенным моментом в ней является утверждение, что причиной возникновения капиллярных волн на поверхности струи фонтана является кавитация.

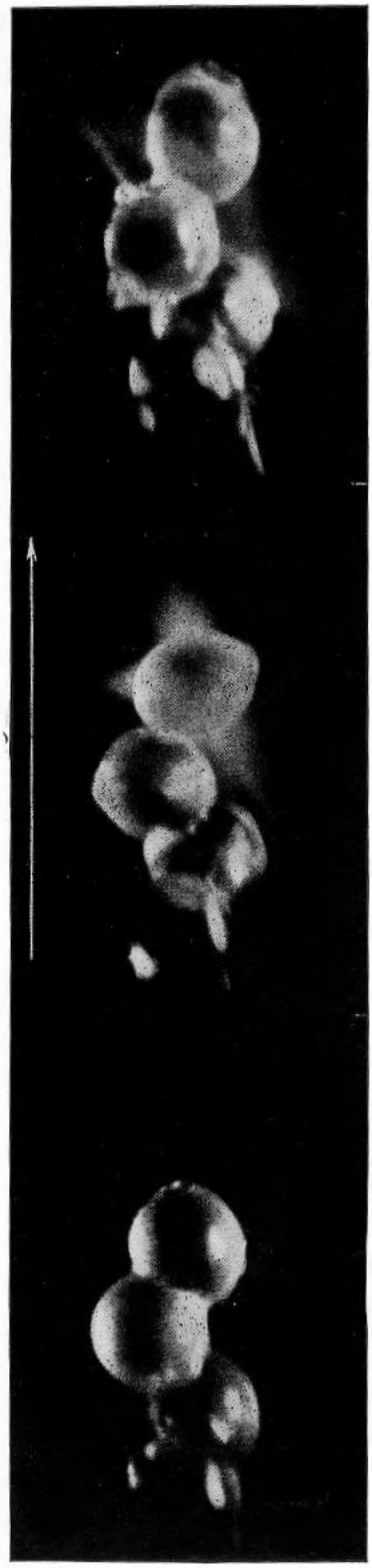
Известно, что при акустической кавитации основная механическая работа совершается ударными волнами, возникающими при захлопывании кавитационных полостей. Образование ударных волн происходит периодически с частотой, равной частоте возбуждающих акустических колебаний. Диспергирование жидкости под действием образующихся таким образом периодических ударных волн может происходить двумя путями: прямым и косвенным.

В первом случае сравнительно крупные капли — брызги образуются при встрече фронта ударной волны с границей раздела жидкость — газ. Именно этот механизм имел в виду Зольнер, когда предлагал кавитационную гипотезу акустического распыления жидкости. Однако основной причиной образования высоко дисперсного аэрозоля, характерного для акустического распыления жидкости, является косвенный механизм диспергирования. Периодические гидравлические удары приводят поверхность жидкости в интенсивное колебательное движение, в результате чего на ее поверхности параметрически возбуждаются стоячие капиллярные

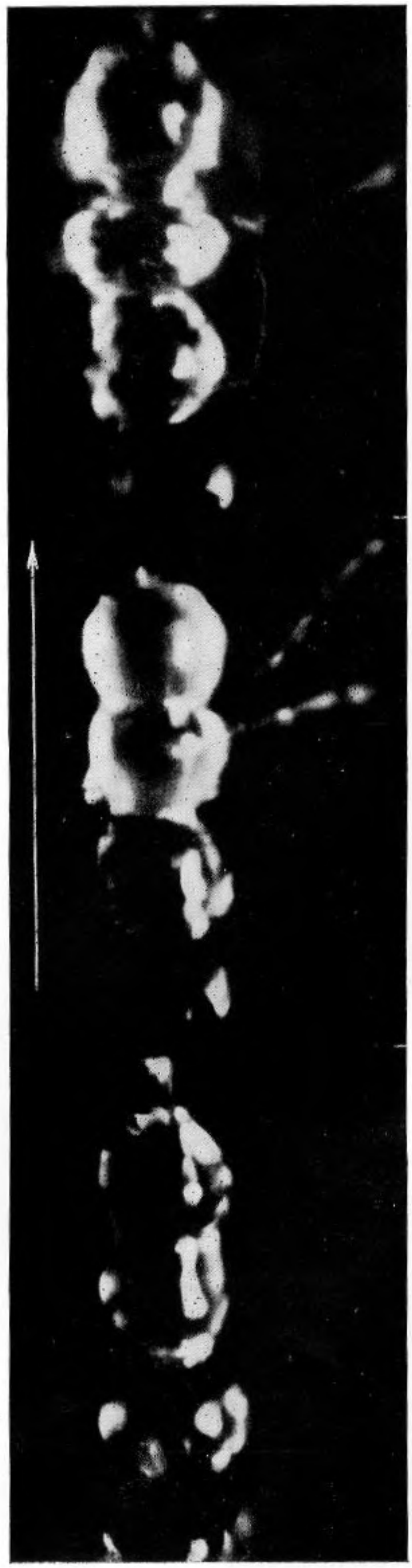
Фиг. 2



Фиг. 3



Фиг. 4



Фиг. 5

волны конечной амплитуды. Капли аэрозоля образуются из гребней этих волн так, как это описывается капиллярно-волновой гипотезой.

С позиций такой кавитационно-волновой гипотезы возможно объяснить широкий круг наблюдаемых закономерностей и явлений, характерных для распыления жидкости в ультразвуковом фонтане. Рассмотрим сперва протекание распыления жидкости в фонтане при напряжениях на излучателе, незначительно превышающих пороговое. Напомним, что в таком режиме струя фонтана как бы состоит из бусинок диаметром около 1 *мм* ($f = 2$ *Мгц*), а выделение тумана происходит импульсами [19, 20]. Для возникновения кавитации в струе необходимо появление в ней по крайней мере одного зародыша кавитации. За несколько периодов зародыш может превратиться в область кавитации, возбуждающую стоячие капиллярные волны на поверхности струи. Появление на поверхности струи фонтана зон посветления в лучах осветительного устройства [20] — результат диффузного рассеяния света от сетки стоячих капиллярных волн. В зависимости от объема и длительности существования кавитационной области в струе, а также от вязкости озвучиваемой жидкости наблюдаются весьма разнообразные картины образования стоячих капиллярных волн и выбросов аэрозоля. Ниже приводятся ряд кадров, полученных в результате киносъемки струи фонтана со скоростью около 5000 *к/сек*. На всех снимках стрелками показано направление развития процесса во времени. Вначале возникают местные очаговые посветления, которые, вслед за тем, либо исчезают (фиг. 2), по-видимому, вследствие прекращения существования кавитационной области, либо распространяются на всю поверхность одной или двух — трех бусинок (фиг. 3). Как правило, посветление бусинок струи завершается выделением аэрозоля. В некоторых (редких) случаях возникшее посветление затем как бы рассасывается без образования аэрозоля [20]. Можно предположить, что амплитуда колебаний поверхности струи в этих случаях превосходит значение, соответствующее порогу возбуждения капиллярных волн, но в то же время остается меньше значения пороговой амплитуды каплеобразования. Наблюдались также образование симметричных струй тумана (фиг. 4, средний кадр) связанное, по-видимому, с возбуждением различных мод колебаний поверхности бусинки, и прямое диспергирование под действием ударных волн (фиг. 5), образующихся при кавитации. Область кавитации, инициируя описанные явления, перемещается потоком жидкости в верхние участки струи и затем исчезает вследствие дефицита акустической энергии разрушения струи. Возникновение следующего цикла распыления обуславливается появлением нового зародыша кавитации.

При напряжении на излучателе, значительно превосходящем пороговое, число зародышей, способных стать центрами кавитации, возрастает настолько, что они постоянно присутствуют в области распыления. В результате временные промежутки между отдельными нарушениями кавитационной прочности жидкости стираются окончательно: процессы кавитации и выделения аэрозоля протекают в непрерывном режиме. В связи с тем, что в режиме большой мощности аэрозоль выбрасывается не одновременно со всей поверхности струи, а из отдельных многочисленных ее участков [19], следует заключить, что распыление и в этом режиме вызывается сравнительно небольшими кавитационными областями, расположение которых в пределах области распыления непрерывно изменяется. Так же просто с позиций кавитационно-волновой гипотезы объясняются существование порога распыления и зависимость его от различных физических условий протекания эксперимента, импульсный характер аэрозолеобразования при напряжении, незначительно превышающем пороговое и другие особенности распыления жидкости в фонтане.

В подтверждение правомерности описанного детального механизма распыления жидкости в фонтане могут быть приведены некоторые оценки величин, найденные расчетным путем.

Величину амплитуды фронта ударной волны P_m, распространяющейся в жидкости, найдем из выражения [21]:

$$P_m = \frac{\rho c^2}{\sqrt{2}\, r_{\min}} \sqrt{\theta \frac{c p_1 r_{\min}}{B(\gamma' - 1)}} \frac{r_{\min}}{R} \frac{1}{\ln(R/r_{\min})}. \tag{1}$$

В этом выражении R — расстояние от центра взрыва до поверхности жидкости, γ' — показатель адиабаты для воды, B — постоянная, равная 3000 *атм*. Минимальный радиус $r_{\min}$ кавитационного пузырька при захлопывании связан с максимальным радиусом $r_{\max}$ следующей зависимостью:

$$\left(\frac{r_{\max}}{r_{\min}}\right)^{3(\gamma-1)} = \frac{p(\gamma - 1)}{p_{\text{н}}}. \tag{2}$$

В выражении (2) $p = p_0 + p_{\text{з}}$, где p_0 — атмосферное и $p_{\text{з}}$ — звуковое давления насыщенного пара при данной температуре.

$$r_{\max} \approx \sqrt{\frac{2}{3} \frac{p_{\text{з}} - p_0}{\rho}} \frac{T}{2}, \tag{3}$$

где T — период пульсаций пузырька, равный периоду акустических колебаний. Максимальное давление p_1 при захлопывании кавитационного пузырька определяется следующим выражением:

$$p_1 = p_{\text{н}} \left[\frac{p(\gamma - 1)}{p_{\text{н}}}\right]^{\gamma/(\gamma-1)}. \tag{4}$$

Характерное время расширения кавитационного пузырька θ можно приблизительно принять равным отношению радиуса пузырька в момент, когда скорость расширения была максимальной, к самой скорости расширения. Таким образом,

$$\theta \approx \frac{e^{1/3} r_{\min}}{\sqrt{\frac{2}{3} \frac{p_1}{e\rho}}}, \tag{5}$$

где e — основание натуральных логарифмов. Полагая $R = 0{,}04$ *см*, $p_{\text{з}} = 16$ *атм* [16] и $T = 0{,}5 \cdot 10^{-6}$ *сек*, $f = 2$ *Мгц*, найдем, что $P_m \approx 1{,}8$ *атм*.

Оценим теперь величину амплитуды смещения поверхности под действием фронта ударной волны. Пренебрегая нелинейным членом в уравнении гидродинамики, рассмотрим интересующее нас явление в линейном приближении в системе координат $z - x$; ось x направим вдоль границы раздела жидкость — газ, ось z — по нормали к этой границе. Для малых возмущений

$$\Delta\varphi = 0, \tag{6}$$

где φ — потенциал скорости колебаний. Условием на границе будет

$$p - p_0 = -\sigma\left(\frac{\partial^2 \xi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \xi}{\partial y^2}\right), \tag{7}$$

где $p = -\rho \dfrac{\partial \varphi}{\partial t}$, а $z = \xi(x, t)$. Продифференцировав выражение (7) по t и заменив затем $\partial\xi / \partial t$ на $\partial\varphi / \partial z$, получим при $z = 0$

$$\rho \frac{\partial^2 \varphi}{\partial t^2} - \sigma \frac{\partial}{\partial z}\left(\frac{\partial^2 \varphi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \varphi}{\partial y^2}\right) = 0. \tag{8}$$

Выбрав решение уравнения (6) в виде

$$\varphi = A e^{kz} \cos(kx - \omega t), \tag{9}$$

и подставив его в уравнение (8), найдем дисперсионное уравнение

$$\omega^2 = \frac{\sigma}{\rho} k^3. \tag{10}$$

Амплитуда колебательной скорости поверхности жидкости V_z в точке $x = 0$, $z = 0$ при $t = 0$ в результате падения на нее фронта ударной волны может быть найдена из выражения

$$V_z = \frac{2P_m}{\rho c} \cos \delta, \tag{11}$$

где δ — угол между нормалью и радиусом-вектором, направленным из центра взрыва к поверхности жидкости. Удвоение P_m происходит вследствие отражения фронта от поверхности жидкости. С учетом формул (9) и (11) выражение для скорости колебаний поверхности жидкости в точке $x = 0$, $z = 0$ можно написать в виде

$$V_z = \frac{2P_m}{\rho c} \cos \omega t. \tag{12}$$

Зная V_z, можно найти величину вертикального смещения поверхности ξ_z в точке $x = 0$

$$\xi_z = \int_0^t V_z \, dt = \frac{2P_m}{\omega \rho c} \sin \omega t. \tag{13}$$

С учетом дисперсионного выражения (10) амплитуда вертикального смещения поверхности будет

$$\xi_z = \frac{P_m}{\rho c} \sqrt{\frac{\rho \lambda^3}{2\pi^3 \sigma}}. \tag{14}$$

Величина λ в выражении (14) может быть оценена как удвоенное произведение $\cos \delta$ и радиуса-вектора R, направленного в точку поверхности, где смещение в e раз меньше смещения по вертикали. Возможно оценить λ и другим способом, если предположить, что под действием ударной волны бусинка начинает совершать колебания 1-й моды. Обе оценки позволяют принять $\lambda \approx R$. Подставив в выражение (14) вычисленное нами значение P_m, а также ρc, σ и λ, найдем, что в наших условиях $\xi_z \approx 14$ *мк*.

С другой стороны, анализ устойчивости колебаний на поверхности капли жидкости сферической формы (т. е. бусинки), проведенный Коненковым [22], позволяет рассчитать величину пороговой амплитуды возбуждения капиллярных волн $A_{\text{п},1}$ на такой поверхности. Расчет показывает, что при $f = 2$ *Мгц* и $R = 0{,}04$ *см* $A_{\text{п},1} \approx 0{,}3$ *мк*. Образование капиллярных волн конечной амплитуды, являющихся источником аэрозоля при акустическом распылении, происходит при $A_{\text{п},2} \geqslant kA_{\text{п},1}$, где $k = 4$ [11], т. е. при $A_{\text{п},2} \geqslant 1{,}2$ *мк*. Очевидно, что найденное выше значение амплитуды смещения поверхности ξ_z под действием фронта ударной волны, образованной кавитирующим пузырьком, приблизительно на порядок выше порогового значения амплитуды каплеобразования.

Таким образом, приблизительный расчет параметров фронта ударных волн, образованных кавитацией, показывает, что эффект является достаточно «сильным», чтобы в соответствии с кавитационно-волновой гипотезой возбудить на поверхности жидкости стоячие капиллярные волны конечной амплитуды, являющиеся источником аэрозоля при акустическом распылении.

В заключение следует упомянуть о новой гипотезе по поводу механизма акустического распыления жидкости, предложенной Польманом и Лирке [23]. Эта гипотеза, являющаяся, по их мнению, компромиссом между кавитационной и капиллярно-волновой гипотезами, была ими предложена

в ответ на представленные нами экспериментальные доказательства активного участия кавитации в процессе распыления жидкости в фонтане. В соответствии с этой гипотезой капли аэрозоля образуются из гребней капиллярных волн конечной амплитуды на поверхности мельчайших полусферических выступов, образованных кавитационными пузырьками, находящимися вблизи поверхности струи фонтана.

Внимательный анализ содержания этой работы показал, что в ней рассматривается поведение не кавитационных, а резонансных паро-газовых пузырьков, находящихся вблизи поверхности распыляемой жидкости. Киносъемка показала, что выделение тумана действительно может происходить и при участии паро-газовых пузырьков (фиг. 4, верхний кадр), однако доля аэрозоля, образующегося таким образом, незначительна.

ЛИТЕРАТУРА

1. R. W. Wood, A. L. Loomis. The physical and biological effects of high frequency sound waves of great intensity. Phil. Mag., 1927, 4, 22, 417—436.
2. K. Söllner. The mechanism of the formation of fogs by ultrasonic waves. Trans. Faraday Soc., 1936, 32, 1532—1536.
3. F. Streibl. Inhalationstherapie-ein neues Anwendungsgebiet des Ultraschalls. Diss., Erlangen, 1947.
4. G. Keck. Ultraschallbeobachtungen an Flüssigkeitsoberflächen. Acustica, 1957, 7, 5, 310—312.
5. K. Bisa, K. Dirnagl, R. Esche. Zerstäubung von Flüssigkeiten mit Ultraschall. Siemens Zeitschrift, 1954, 28, 8, 314—347.
6. A. E. Crawford. Production of spray by high power magnetostriction transducers. J. Acoust. Soc. America, 1955, 27, 1, 176—177.
7. K. Stamm. Die Vernebelung schmelzbarer Festkörper mit Ultraschall. Forschungsberichte des Landes Nordrhein — Westfallen. No 933. WDV Köln und Opladen, 1960.
8. R. Pohlman, K. Stamm. Untersuchung zum Mechanismus der Ultraschallvernebelung an Flüssigkeitsoberflächen im Hinblick auf technische Anwendungen. Forschungsberichte des Landes Nordrhein — Westfallen. No 1480. WDV Köln und Opladen, 1965.
9. R. J. Lang. Ultrasonic atomization of liquids. J. Acoust. Soc. America, 1962, 34, 1, 6—8.
10. В. И. Сорокин. Об эффекте фонтанирования капель с поверхности вертикально колеблющейся жидкости, Акуст. ж., 1957, 3, 3, 262—273.
11. W. Eisenmenger. Dinamic properties of the surface tension of water and aqueous solutions of active agents with standing capillary waves in the frequency range from 10 kc/s to 1,5 mc/s. Acustica, 1959, 9, 4, 327—340.
12. R. J. Lang. Sonic atomizer for liquids. US Patent No 3, 103, 310, 1961.
13. Оно Такаси, Накагава Ютака, Тории Цунэо и др. Распыление жидкостей ультразвуком. Перевод NEC, 1963, 62, 10—18.
14. G. Pickroth. Ultraschallverneblung in der Medizin. Das Deutsche Gesundheitswesen, 1958, 13, 33, 1030—1034.
15. О. К. Экнадиосянц. О распылении жидкости низкочастотными ультразвуковыми колебаниями. Акуст. ж., 1966, 12, 1, 127—129.
16. О. К. Экнадиосянц. Распыление жидкости акустическими колебаниями (канд. диссертация). Акустический институт АН СССР, 1967.
17. О. К. Экнадиосянц. О роли кавитации в процессе распыления жидкостей в ультразвуковом фонтане. Акуст. ж., 1968, 14, 1, 107—111.
18. Э. Л. Гершензон, О. К. Экнадиосянц. О природе распыления жидкостей в ультразвуковом фонтане. Акуст. ж., 1964, 10, 2, 156—162.
19. Б. И. Ильин, О. К. Экнадиосянц. К вопросу о природе распыления жидкостей в ультразвуковом фонтане. Акуст. ж., 1966, 12, 3, 310—318.
20. Л. Д. Розенберг, О. К. Экнадиосянц. О кинетике ультразвукового туманообразования. Акуст. ж., 1960, 6, 3, 370—373.
21. Р. Коул. Подводные взрывы. М., ИЛ, 1950.
22. Ю. К. Коненков. Исследование параметрического возбуждения капиллярных волн на поверхности капли. Отчет АН СССР, М., 1960.
23. R. Pohlmann, E. G. Lierke. Zum. Flüssigkeitsvernebelung mit Ultraschall unter besonderer Berücksichtigung der Aerosolerzeugung. 5e Congrès International d'Acoustique, Liege, 1965, D35.

Акустический институт АН СССР
Москва

Поступила в редакцию
1 ноября 1967 г.