

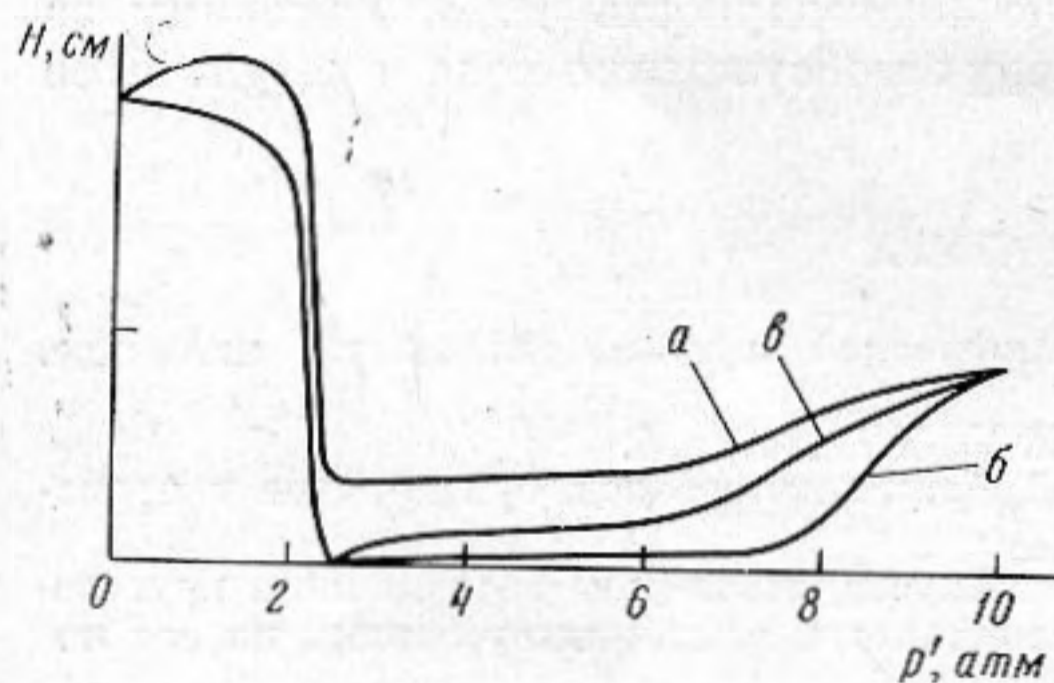
УДК 534.29

**О ВЛИЯНИИ СТАТИЧЕСКОГО ДАВЛЕНИЯ  
НА ФОНТАНИРОВАНИЕ ЖИДКОСТИ  
ПОД ДЕЙСТВИЕМ УЛЬТРАЗВУКА**

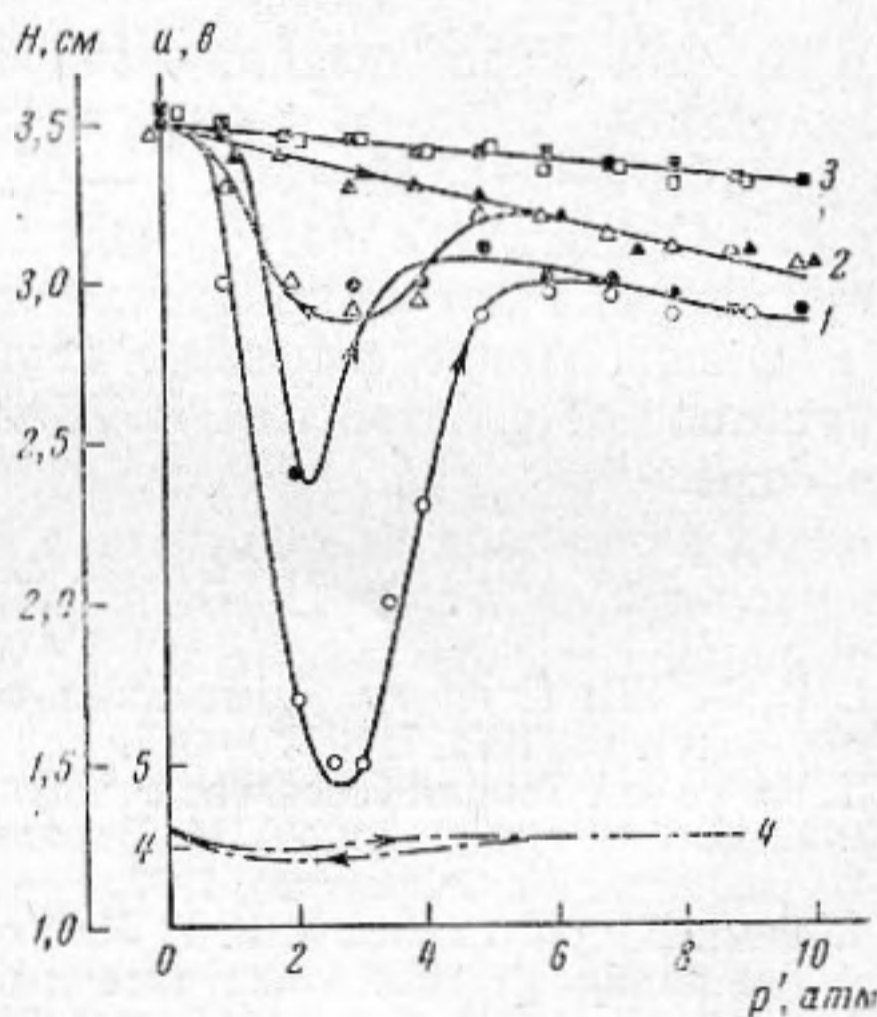
*Б. И. Ильин, О. К. Экнадиосяни*

Экспериментально обнаружено существование минимума на кривой зависимости высоты ультразвукового фонтана от величины избыточного статического давления воздуха. Существование такого минимума объясняется избирательным затуханием ультразвука, обусловленным существованием максимума в распределении радиусов газовых пузырьков в воде, приобретающих при избыточном давлении резонансные значения. Органические жидкости и дегазированная вода этим свойством не обладают.

При исследовании физической природы распыления жидкости в ультразвуковом фонтане было установлено, что увеличение давления окружающего газа приводит к возрастанию порога распыления и к снижению частоты импульсов образования аэрозоля [1]. Причиной этого явления в равной степени могут быть как изменение режима фонтанирования, связанное с увеличением давления газовой среды, так и непосредственное влияние избыточно-



Фиг. 1



Фиг. 2

го статического давления на процесс диспергирования в ультразвуковом фонтане.

Впервые изменение высоты ультразвукового фонтана в зависимости от статического давления было обнаружено Бюснелем и Дегруа [2], использовавшими для создания фонтана плоский излучатель, работающий на частоте около 1 Мгц. На фиг. 1 приведен полученный ими график зависимости высоты  $H$  водяного фонтана от избыточного статического давления  $p'$  газовой среды над жидкостью. С возрастанием избыточного давления высота фонтана изменяется в соответствии с кривой  $a$ , с понижением давления — в соответствии с кривой  $b$ . Кривая  $в$ , занимающая промежуточное положение между кривыми  $a$  и  $b$ , показывает, как изменяется

высота фонтана, если, понизив избыточное давление по кривой *б* с 10 до 2,5 атм, вновь начать его увеличивать. Бюснель и Дегруа сообщают, что аналогичные результаты были получены ими и в экспериментах с другими жидкостями: эфиром, спиртом, маслами и др. С переходом от одной жидкости к другой несколько изменялись абсолютные величины, общий же вид зависимостей *H* от *p'* при этом оставался неизменным [2].

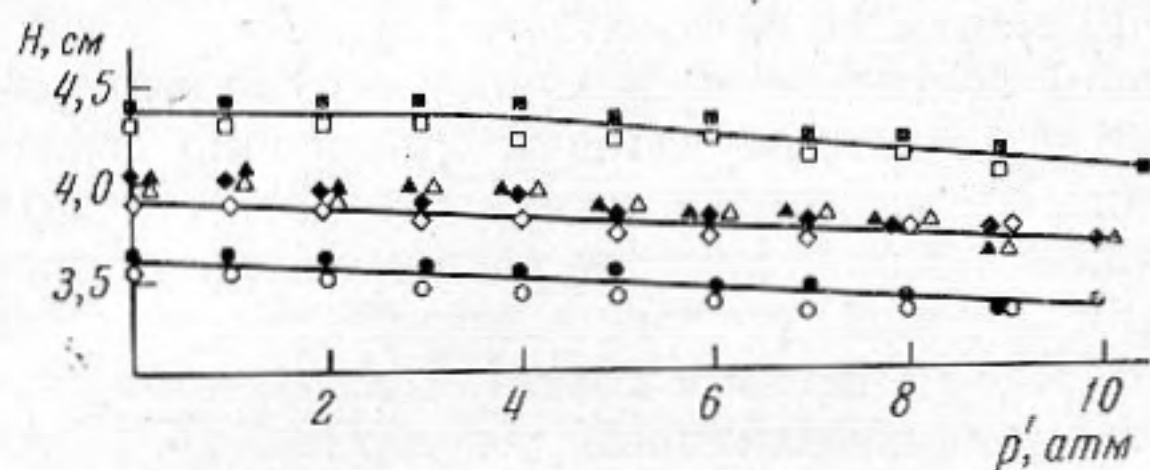
Как известно, при неизменном статическом давлении высота ультразвукового фонтана, создаваемого плоским излучателем однозначно связана с интенсивностью ультразвука. Из рассмотрения кривых фиг. 1 можно было бы предположить, что снижение интенсивности распыления при увеличении избыточного давления газовой среды является результатом уменьшения количества энергии, поступающей в область распыления ультразвукового фонтана. Поэтому экспериментальные результаты Бюснеля и Дегруа ставили под сомнение наш вывод о непосредственном влиянии избыточного давления на сам процесс диспергирования жидкости в ультразвуковом фонтане [1]. В связи с тем, что эксперименты с повышенным давлением могут пролить свет на установление правильности той или иной гипотезы о природе ультразвукового распыления жидкости, мы сочли целесообразным повторить эксперименты Бюснеля и Дегруа, используя при этом более совершенную методику эксперимента. Для измерения высоты фонтана наиболее удобно формировать его на относительно высоких частотах с помощью ультразвуковых фокусирующих излучателей. При этом для образования фонтана возможно обойтись сравнительно небольшими мощностями; фонтан устойчив и имеет правильную форму, что облегчает проведение измерений.

Кривая 1 на фиг. 2 показывает изменение высоты фонтана в свежей водопроводной воде в функции избыточного статического давления газовой среды (воздуха). Верхняя ветвь этой кривой соответствует увеличению избыточного давления от 0 до 10 атм, нижняя — отражает изменение фонтана при снижении давления до атмосферного. Напряжение *U* на излучателе, имеющем частоту собственных колебаний 1,0 Мгц, в течение всего этого эксперимента поддерживалось постоянным. Если же это условие не соблюдается, то зависимость *H* от *p'* становится еще более ярко выраженной. Провал кривой при прямом ходе становится более глубоким, а при обратном ходе в районе 2 ÷ 3 атм фонтан полностью исчезает. При этом напряжение на излучателе изменяется (кривая 4) аналогично изменению высоты фонтана *H*, т. е. минимальной высоте фонтана соответствует и минимальное значение напряжения на излучателе. Очень интересно также, что это минимальное значение напряжения меньше при обратном ходе, чем при прямом.

Совсем другие результаты получаются при проведении того же эксперимента с тщательно дегазированной (вакуумированной с наложением ультразвука) дистиллированной водой. Кривая изменения высоты фонтана (кривая 3) для такой воды не имеет провала, а прямой ход полностью совпадает с обратным. С увеличением избыточного давления происходит лишь незначительное монотонное уменьшение высоты фонтана. При давлении 10 атм высота фонтана уменьшается не более чем на 6% первоначальной высоты (при *p' = 0 атм*). При повторном измерении изменения высоты фонтана при той же воде без ее дополнительной дегазации у кривой *H* появляется небольшой провал, глубина которого растет с увеличением количества циклов повторных измерений. В свете этого факта объясняется гистерезис кривой зависимости высоты фонтана *H* от величины избыточного давления *p'*. Кривая 2 соответствует эксперименту с отстоявшейся в течение длительного времени (без дегазации) дистиллированной водой. По своему типу эта кривая занимает промежуточное положение между кривыми 1 и 3.

На фиг. 3 представлены результаты экспериментов с органическими жидкостями — тетралином (ромбики), диметилфталатом (кружки), изо-

бутиловым (треугольники) и метиловым (квадратики) спиртами, при постоянном напряжении на излучателе, имеющем частоту собственных колебаний  $2 \text{ Мгц}$ . При этом темные точки соответствуют возрастанию избыточного давления, светлые — его уменьшению. Как видно из графика, высота фонтана для всех использованных нами органических жидкостей



Фиг. 3

изменяется при варьировании избыточного давления газовой среды над жидкостью приблизительно одинаково. С увеличением избыточного давления до  $10 \text{ атм}$  фонтан монотонно снижается не более чем на  $10\%$  от первоначальной высоты при  $p' = 0 \text{ атм}$ , прямой ход совпадает с обратным, кривые не

имеют провала. Следует заметить, что никакого заметного изменения напряжения на излучателе без его стабилизации в экспериментах с органическими жидкостями и с тщательно обезгаженной дистиллированной водой не наблюдалось.

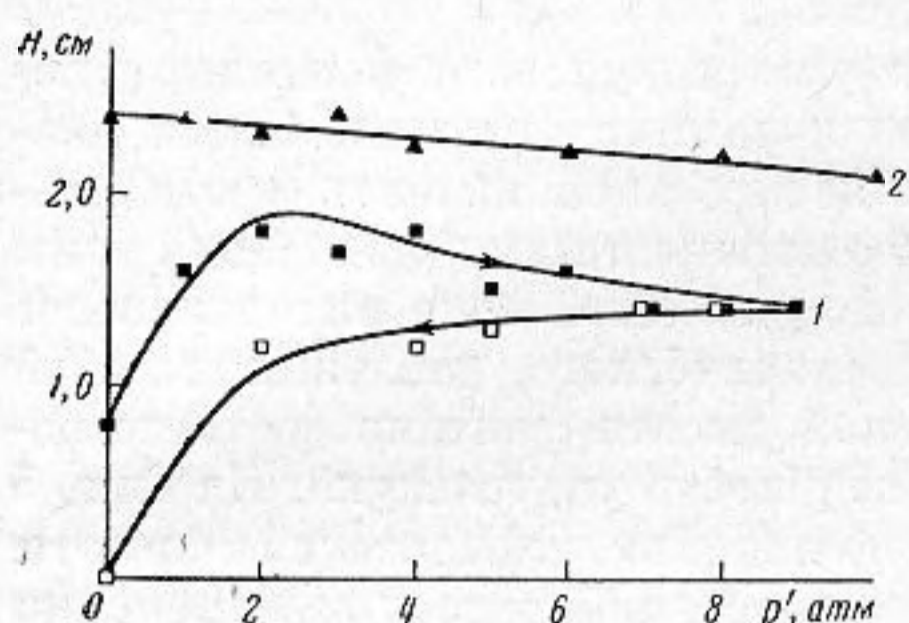
Сопоставим теперь результаты экспериментов Бюснеля и Дегруа с нашими. Качественное совпадение результатов наблюдается только в экспериментах с недегазированной водой, причем это совпадение увеличивается, если не стабилизировать напряжение на излучателе. Следовательно, высота фонтанов, образующихся при воздействии на недегазированную воду ультразвука частоты  $1$  и  $2 \text{ Мгц}$  от избыточного давления изменяется приблизительно одинаковым образом. В отличие от Бюснеля и Дегруа мы считаем, что существование характерного провала у кривых изменения высоты фонтана является свойством, присущим только недегазированной воде. Тщательно дегазированная вода и органические жидкости этим свойством не обладают. Следовательно, описанное в работе [1] снижение интенсивности распыления органических жидкостей при наложении избыточного давления может быть вызвано только прямым воздействием давления на сам процесс диспергирования жидкости в ультразвуковом фонтане.

На основании найденной экспериментальной зависимости  $H$  от  $p'$  могут быть также сделаны некоторые выводы об акустических свойствах использованных нами жидкостей. Прежде всего свежая, водопроводная отстоявшаяся и дегазированная вода отличаются друг от друга газосодержанием. Известно, что присутствие в жидкости сравнительно небольшого количества резонансных газовых пузырьков на пути звуковой волны приводит к ее значительному затуханию вследствие рассеяния и поглощения звука. Рассеяние звука резонансными пузырьками примечательно в том отношении, что эффективное сечение рассеяния  $\zeta$  (где  $\zeta = \pi(\lambda/\pi)^2$ ) такого пузырька, малого по сравнению с длиной волны, значительно превышает его геометрическое сечение  $\pi R_p^2$  [3]. Для небольших амплитуд колебаний пузырька, когда амплитуда звукового давления  $p_3$  значительно меньше статического давления  $p$  в жидкости ( $p = p' + 1 \text{ атм}$ ), его резонансная частота  $f_p$  может быть определена из выражения, полученного Минертом [4]:

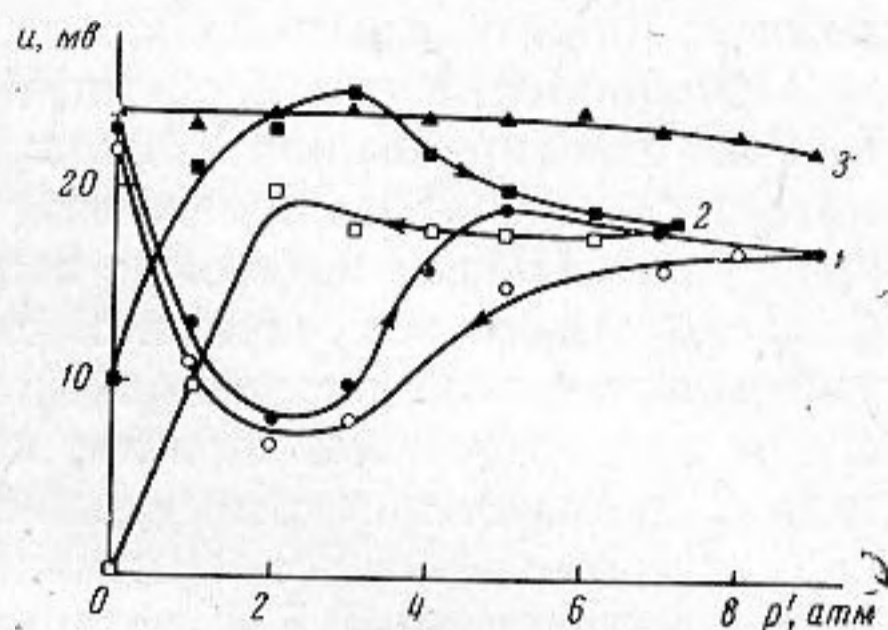
$$f_p = \frac{1}{2\pi R} \sqrt{\frac{3\gamma}{\rho} \left( p + \frac{2\sigma}{R} \right)},$$

где  $R$  — радиус пузырька,  $\rho$  — плотность жидкости  $\gamma = C_p / C_v$  — отношение удельных теплоемкостей для газа в пузырьке и  $\sigma$  — коэффициент поверхностного натяжения. В воде, находящейся под нормальным атмосферным давлением ( $p' = 0 \text{ атм}$  или  $p = 1 \text{ атм}$ ), радиус резонансного воздушного пузырька, соответствующий частоте  $2 \text{ Мгц}$ , равен  $R_{p, 1 \text{ атм}} = 2,1 \text{ мк}$ . Из приведенного выражения видно, что с возрастанием стати-

ческого давления при всех неизменных остальных условиях резонансными станут газовые пузырьки большого радиуса. Так, например, при  $p = 6 \text{ атм}$ ,  $R_{p, 6 \text{ атм}} \approx 2 R_{p, 1 \text{ атм}}$ . В связи с зависимостью высоты ультразвукового фонтана от интенсивности ультразвука, наблюдаемый ход кривой  $H \div p'$  для недегазированной воды может быть объяснен существова-



Фиг. 4



Фиг. 5

нием избирательного затухания ультразвука в области избыточного давления, ограниченной одной и пятью атмосферами. Предположим, что это избирательное затухание связано с присутствием в жидкости резонансных газовых пузырьков. Следствием правомерности такого предположения должно быть существование максимума в распределении радиусов газовых пузырьков в воде, приобретающих при избыточном давлении  $1 \text{ атм} < p' < 5 \text{ атм}$  и  $f = 2 \text{ Мгц}$  резонансные значения. Воспользовавшись кривыми фиг. 2, с помощью приведенного выше выражения и уравнения состояния для идеального газа можно установить границы этого максимума. В результате несложного вычисления найдем, что этими границами являются 3 и 8 мк, причем экстремально определенный радиус расположен приблизительно посередине этого диапазона. Наличие именно такого максимума в распределении радиусов газовых пузырьков — свойство, присущее, по-видимому, только свежей водопроводной воде. Ни дегазированная, ни отстоявшаяся вода, ни, тем более, органические жидкости этим свойством не обладают. Повышение статического давления приводит к уменьшению всех имеющихся в жидкости газовых пузырьков, в том числе и соответствующих максимуму распределения. При некотором давлении радиус газовых пузырьков, являющийся в условиях нормального давления наиболее часто встречающимся, совпадает с резонансным. Затем, при дальнейшем увеличении статического давления наиболее часто встречающийся радиус, уменьшаясь, вновь перестает быть резонансным.

Найдем, воспользовавшись приведенным выше выражением, такую частоту акустических колебаний, которая соответствует пузырькам с радиусами, заключенными в пределах от 3 до 8 мк, являющимися резонансными при нормальном атмосферном давлении. Частота 0,5 Мгц вполне удовлетворяет поставленному условию, так как этой частоте соответствует  $R_p = 6,6 \text{ мк}$ . Основываясь на нашей трактовке причины изменения высоты фонтана в условиях изменяющегося статического давления газовой среды, следует ожидать, что высота фонтана в свежей водопроводной воде, образованного ультразвуком частоты 0,5 Мгц, будет теперь минимальной при нормальном атмосферном давлении газовой среды над жидкостью. Затем, с возрастанием избыточного давления должна увеличиваться и высота ультразвукового фонтана. Эксперимент полностью подтвердил все эти предположения (см. кривую 1 фиг. 4). В дегазированной воде под действием ультразвука частоты 0,5 Мгц образуется сравнительно высокий фонтан при нормальном давлении (кривая 2), причем высота его с увеличением статического давления остается практически неизменной.

Помимо рассеяния в жидкости происходит и поглощение звука, сопровождающееся возникновением потоков. Эксперименты с отсечением потоков с помощью звукопроницаемой пленки привели нас к выводу, что их участие в образовании фонтана незначительно. Действительно, наличие пленки не оказывало заметного влияния на фонтанирование жидкости даже в том случае, когда пленка устанавливалась у основания фонтана немного ниже фокальной области излучателя.

Одновременно с измерениями высоты ультразвукового фонтана с помощью пьезоприемника (полая сфера из керамики титаната бария диаметром 5 мм), проводились измерения относительной интенсивности ультразвука в области жидкости, лежащей значительно ниже фокальной зоны фокусирующего излучателя. В свежей водопроводной воде интенсивность ультразвука изменялась при изменении статического давления газовой среды над жидкостью, причем минимальной высоте фонтана соответствовала и минимальная относительная интенсивность ультразвука. На фиг. 5 кривая 1 соответствует изменению интенсивности ультразвука частоты 2 Мгц, кривая 2 — 0,5 Мгц в свежей водопроводной воде при изменении статического давления  $p'$ .  $U$  — напряжение на выходе пьезоприемника в милливольтках. В дегазированной воде (кривая 3) и в органических жидкостях относительная интенсивность ультразвука частоты 0,5 и 2 Мгц при изменении статического давления оставалась практически неизменной.

Что касается небольшого монотонного уменьшения высоты ультразвукового фонтана во всех жидкостях, в том числе и дегазированных, то возможно предположить, что оно является следствием воздействия избыточного давления на работающий пьезокерамический преобразователь.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Б. И. Ильин, О. К. Экнадиосянц. К вопросу о природе распыления жидкостей в ультразвуковом фонтане. Акуст. ж., 1966, 12, 3, 310—318.
2. R. G. Busnel, M. Degrois. Variation dans un liquide en fonction d'une pression gazeuse croissante ou décroissante. Communications du congrès international sur les traitements par les ultrasons. Marseille, 1955, 25—29.
3. M. L. Exner. Messung der Dampfung pulsierender Luftblasen im Wasser. Akust. Beihefte, 1951, 1, 25—33.
4. M. Minnaert. On musical air-bubbles and the sounds of running water. Phil. Mag., 1933, 16, 7, 235.

Акустический институт АН СССР  
Москва

Поступила в редакцию  
1 ноября 1967 г.