

УДК 534.29:532.695

О ХАРАКТЕРЕ ВОЗМУЩЕНИЙ, ВЫЗЫВАЮЩИХ ОБРАЗОВАНИЕ ДИСПЕРСНОЙ ФАЗЫ ЭМУЛЬСИИ В АКУСТИЧЕСКОМ ПОЛЕ*С. А. Недужий*

Рассмотрен характер возмущений, вызывающих переход жидкости в дисперсное состояние в процессе эмульгирования. Экспериментальное исследование природы возмущений установило их кавитационный характер. Проведен сравнительный анализ данных о возникновении и развитии процесса образования эмульсии с точки зрения условий возникновения и развития кавитации. Полученные выводы позволили сформулировать гипотезу о механизме перехода жидкости в дисперсное состояние, предполагающую, что переход жидкости в дисперсное состояние совершается в фазе захлопывания кавитационных пузырьков.

Проведенные автором ранее исследования процесса образования эмульсии прямого и обратного типов в акустическом поле [1—6], позволяют составить представление о характере возмущений, вызывающих переход одной из жидких фаз в дисперсное состояние.

Так, в одной и той же системе исходных жидкостей (дибутилфталат — вода) оказалось возможным наблюдать избирательное образование эмульсии прямого и обратного типов путем изменения только интенсивности ультразвука. Например, образование эмульсии типа масло — вода наблюдалось при определенной интенсивности, которую мы назвали первой пороговой, в то время как образование эмульсии обратного типа возникало, наряду с образованием эмульсии прямого типа, при достижении большей интенсивности, названной второй пороговой.

Это показывает, что действие локальных возмущений, вызывающих образование эмульсий, носит направленный характер. Можно предположить, что центр отдельного возмущения располагается несимметрично по отношению к границе раздела жидких фаз. В этом случае в образовании эмульсии того или другого типа должны принимать участие возмущения, расположенные соответственно с одной или другой стороны межфазной границы раздела.

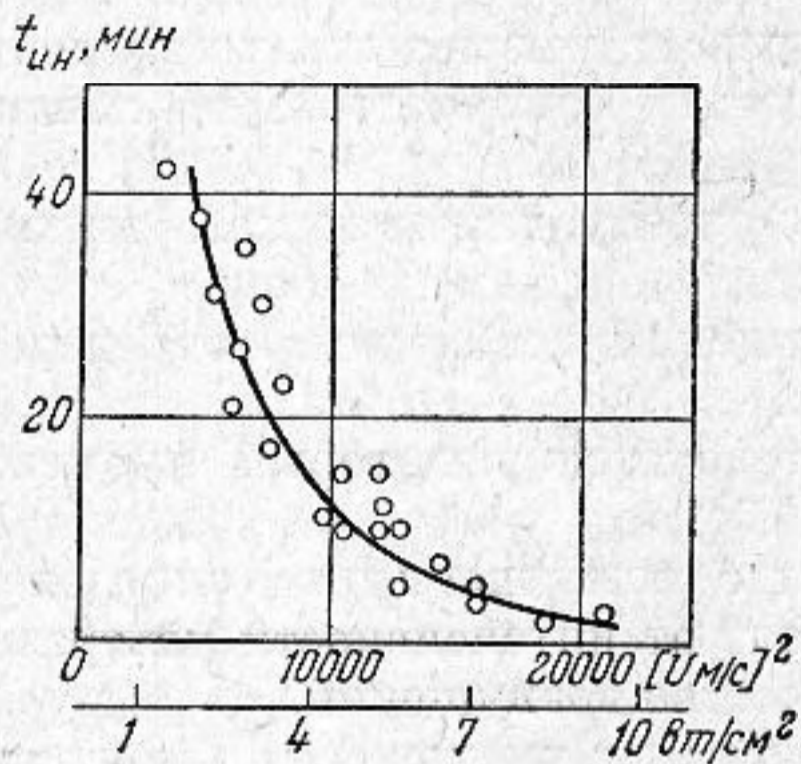
Для формирования таких возмущений в акустическом поле необходимо определенное время, названное нами «инерционным периодом», длительность которого $t_{ин}$ зависит от интенсивности ультразвука, фиг. 1 [6].

В использованном нами при опытах интервале изменения интенсивности ультразвука (до 10 вт/см^2 на поверхности преобразователя) интенсивность действия отдельного возмущения, по-видимому, существенно не изменяется, так как при изменении интенсивности начальный состав дисперсной фазы и характер его статистического распределения остаются неизменным [3].

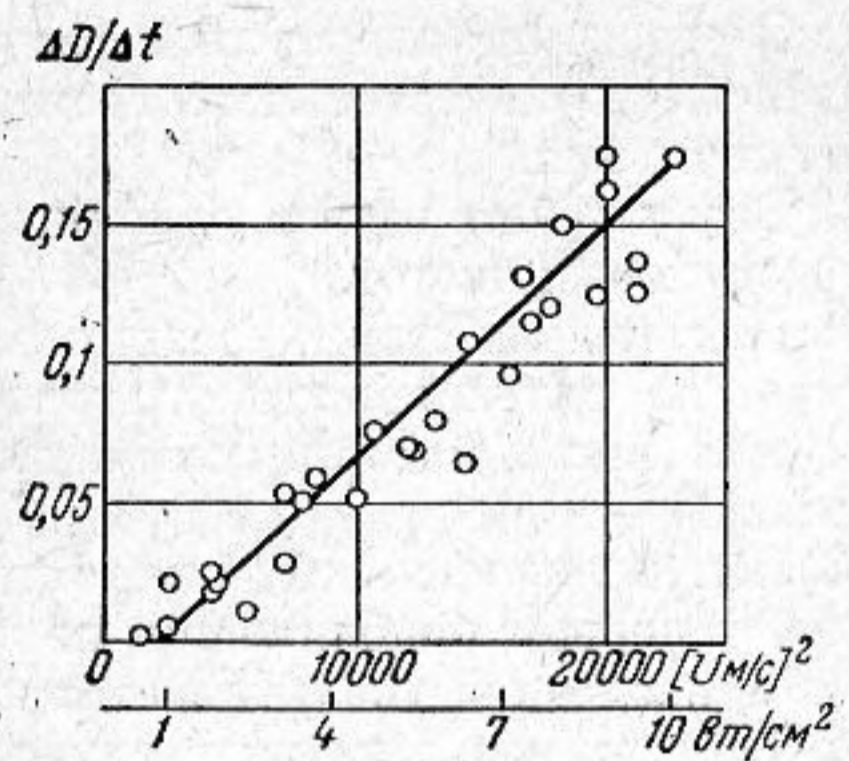
Если считать, что размер частиц при прочих равных условиях определяется величиной и длительностью воздействия приложенных усилий, то из результатов исследования начального состава дисперсной фазы, полученной на соответствующей частоте, следует, что в образовании дисперсной фазы принимают участие возмущения, весьма близкие по величине [3, 4]. Такое положение сохраняется во всем использованном нами диапа-

зоне частот ($22 \div 2000$ кгц) и позволяет предположить, что в этом интервале частот образование дисперсной фазы вызывается возмущениями одинаковой природы.

Как было показано в работе [4], состав дисперсной фазы зависит от частоты, причем с ростом последней степень дисперсности увеличивается, приближаясь к критической величине (10^{-5} см). Такая зависимость позволяет сделать предположение, что помимо изменения длительности воздействия возмущения с ростом частоты соответственно происходит уменьшение и размеров возмущения. При этом интенсивность, необходимая для



Фиг. 1



Фиг. 2

образования отдельного возмущения и соответственно интенсивность его действия должны существенно увеличиться, так как рост дисперсности эмульсии, особенно при приближении к критической величине, связан со значительным увеличением затрачиваемой на это работы. Последнее подтверждается как нашими наблюдениями, так и литературными данными. Известно [7], что с повышением частоты ультразвука образование эмульсии протекает при больших уровнях интенсивности.

С увеличением интенсивности ультразвука происходит интенсификация процесса образования эмульсии. Такой рост «производительности» возможен только в результате увеличения количества локальных возмущений, вызывающих рассматриваемый процесс. Это подтверждается визуальными наблюдениями и анализом фотографий, иллюстрирующих начальную стадию процесса образования эмульсии. В соответствии с этим, полученная в работе [6] зависимость скорости процесса от интенсивности ультразвука (фиг. 2*) при неизменной частоте будет одновременно характеризовать и рост числа возмущений, участвующих соответственно в процессе образования эмульсии прямого и обратного типов. В противном случае необходимо было бы считать, что либо растет количество частичек дисперсной фазы, одновременно образующихся под действием единичного возмущения, что мало вероятно, так как в этом случае начальный состав дисперсной фазы носил бы полидисперсный характер, либо происходит увеличение числа актов перехода в единицу времени. Однако последнее невозможно, так как определяющим фактором для количества актов перехода в единицу времени является частота ультразвука, которая, как сказано, остается неизменной.

Высказанные соображения относительно характера возмущений позволяют считать, что, регулируя условия возникновения и развития возмущений соответственно по ту или другую сторону межфазной границы раздела

* На фиг. 2 по ординате отложена скорость изменения оптической плотности эмульсии \bar{D} , пропорциональная концентрации дисперсной фазы.

жидкостей, можно оказать влияние на тип эмульсии и на эффективность процесса ее образования.

Для полноты характеристики возмущений необходимо добавить, что процесс образования эмульсии протекает преимущественно на границе раздела исходных жидких фаз и стенки реакционного сосуда. Надо полагать, что в этих местах существуют более выгодные, с энергетической точки зрения, условия для возникновения и развития возмущений.

В результате рассмотрения характера возмущений, вызывающих образование дисперсной фазы эмульсии в акустическом поле, можно отметить следующие особенности:

1. Образование дисперсной фазы эмульсии вызывается возмущениями определенного качественного состава, весьма однородными по характеру своего действия.

2. Возмущения имеют одинаковую природу для широкого диапазона ультразвуковых частот.

3. Для начала формирования возмущений необходима определенная «пороговая» интенсивность ультразвука.

4. Для формирования возмущения требуется некоторый промежуток времени.

5. Интенсивность действия отдельного возмущения на определенной частоте в первом приближении не зависит от интенсивности ультразвука; с ростом последней увеличивается количество возмущений.

6. С ростом частоты ультразвука происходит уменьшение размеров возмущений.

7. Действие отдельного возмущения имеет направленный характер, т. е. центры возмущений расположены несимметрично по отношению к межфазной границе.

8. В образовании эмульсии определенного типа участвуют возмущения, расположенные с определенной стороны межфазной границы раздела.

9. С энергетической точки зрения более выгодными местами для возникновения и развития возмущений является область, включающая границу раздела жидких фаз с твердой фазой.

Принципиально говоря, можно было бы высказать два предположения о природе возмущений, вызывающих образование эмульсии. Первое — это предположение о кавитационной природе явления, второе — об участии в этом явлении поверхностно-капиллярных волн. Однако в работе [4] показано, что второе предположение не подтверждается экспериментальными данными о зависимости размера частиц дисперсной фазы от частоты ультразвука. Поэтому, остается лишь предположение о кавитационной природе возмущений.

Это предположение было проверено экспериментально с использованием известной реакции с выделением свободного йода (J) из раствора йодистого калия (KJ), протекающей в акустическом поле только при наличии кавитации [8, 9]. При этом, как было показано в работе [10], такая реакция возможна только при наличии газовой кавитации. Индикатором на свободный йод служил раствор крахмала.

В экспериментах был использован 7%-ный водный раствор KJ так как, согласно работе [11], такая концентрация соответствует максимальному выходу йода. Для повышения чувствительности реакции в реакционную зону вводился четыреххлористый углерод (CCl_4) [12]. При этом для получения максимальной чувствительности в зоне, включающей только межфазную границу исходных жидких фаз, CCl_4 вводился нами не в водный раствор KJ, как обычно, а растворялся предварительно в дибутилфталате*. Водный раствор KJ с крахмалом вводился в реакционный сосуд непосредственно перед облучением. Так как CCl_4 мог переходить в водный раствор KJ только с межфазной границы (особенно в ходе образования

* CCl_4 вводился в дибутилфталат в пропорциях от $1/7$ до $1/100$ по объему.

эмульсии), то зона, ближайшая к этой границе, и обладала максимальной чувствительностью.

Наблюдения в ходе экспериментов и последующий анализ полученных цветных фотографий [13] показали, что процесс образования эмульсии прямого типа сопровождается одновременно появлением окраски зон образования эмульсии в синий (фиолетовый) цвет, т. е. процесс выделения йода совпадает как по месту протекания, так и во времени с процессом образования эмульсии. Такое положение позволяет заключить, что процесс образования дисперсной фазы эмульсии вызывается в основном возмущениями кавитационного характера. Наряду с этим, необходимо отметить, что в образовании эмульсии одновременно участвуют и пузырьки резонансного типа. В связи с этим представляют интерес некоторые данные о развитии и протекании кавитации в акустическом поле и в свете этих данных рассмотрение полученных нами зависимостей, характеризующих процесс образования эмульсии.

Считают, что наиболее вероятными зародышами являются воздушные пузырьки размером $10^{-5} - 10^{-3}$ см [8, 9]. При определенных значениях амплитуды переменного давления в его отрицательной фазе такие зародыши способны кавитировать. Величина кавитационного порога обусловлена, главным образом, наличием кавитационных зародышей и условиями их развития [14—16], т. е. как физическими параметрами исходных жидких фаз и их состоянием, так и свойствами граничных поверхностей в случае контакта кавитационной области со стенками сосуда. В частности, в работах [17, 18] было показано, что кавитационная прочность жидкости, при прочих равных условиях, зависит от ее вязкости — с повышением вязкости растет ее кавитационная прочность. Аналитическое выражение зависимости порогового давления кавитации P_c от вязкости η (в пуазах) приведено в работе [17] в следующем виде:

$$P_c = 1 / 3,05 \cdot \ln (\eta / \eta_0 + 1)$$

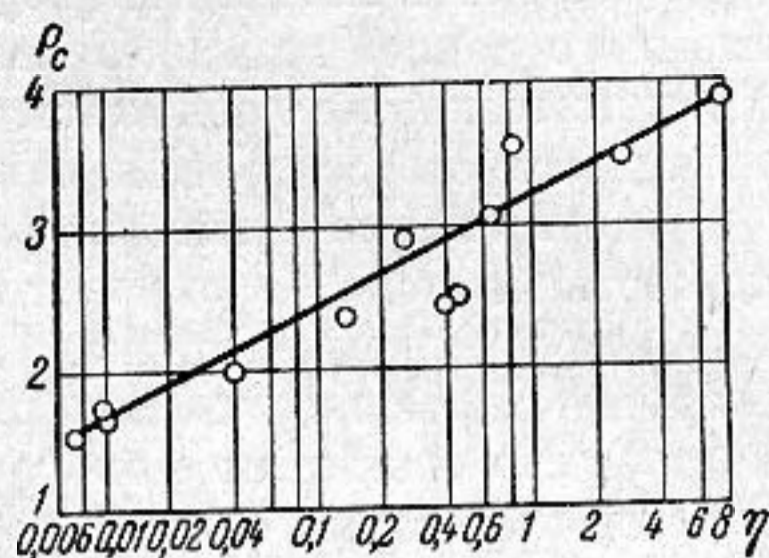
(см. фиг. 3).

Эти данные позволяют полагать, что в рассматриваемой нами системе жидких фаз вода — дибутилфталат, первая пороговая величина интенсивности ультразвука соответствует кавитационной прочности воды, вторая — кавитационной прочности дибутилфталата как более вязкой жидкости. Если принять во внимание, что экспериментально полученная первая пороговая интенсивность соответствовала началу процесса образования эмульсии прямого типа (масло — вода), а вторая — процессу образования эмульсии и обратного типа (вода — масло), то можно заключить, что процесс перехода одной из исходных жидкостей в дисперсное состояние происходит в ту жидкую фазу (дисперсионную среду), в которой протекает кавитационный процесс. Согласно этому, тип эмульсии, в первую очередь, будет определяться кавитационной прочностью исходных жидких фаз. При этом дисперсионной средой будет служить жидкость с относительно меньшей кавитационной прочностью.

Возвращаясь опять к рассмотрению кавитации, необходимо отметить, что размер зародышей, участвующих в кавитационном процессе, зависит от амплитуды приложенного давления. Минимальное значение для радиуса зародыша R_0 способного кавитировать при переменном давлении с амплитудой $(P_0 - P_A)$, определяется выражением, приведенным в работе [19]

$$P = (P_0 - P_A) = \sqrt[3]{\frac{9}{2} [3\sigma^3 / 2R_0^3 \cdot 1 / (P_A + 2\sigma / R_0)]^{1/2}},$$

где P_A — гидростатическое давление; σ — поверхностное натяжение.



Фиг. 3

Если зародыш слишком мал, чтобы кавитировать при данной амплитуде переменного давления, то он, находясь в акустическом поле, совершает радиальные колебания с частотой возбуждения. При этом происходит рост зародышей в результате «выпрямленной» диффузии в его полость газов, растворенных в жидкости [20]. Поэтому при определенной амплитуде переменного давления может иметь место период времени, в течение которого кавитация не возникает. За этот период происходит развитие зародыша до такого состояния, при котором он уже способен кавитировать.

Существование такого периода отмечается в работах [20, 21, 22]. Длительность периода (названного нами «инерционным») зависит от природы жидкости и ее температуры. Так, согласно работе [23] с повышением температуры длительность инерционного периода уменьшается. Как видно, имеет место аналогия между инерционным периодом, предшествующим процессу кавитации и инерционным периодом, предшествующим процессу образования эмульсии (фиг. 1). Заметим кстати, что для резонансного пузырька так же характерно существование «инерционного» периода, в течение которого происходит рост газового зародыша до резонансных размеров.

Максимальный размер кавитирующего пузырька R_m зависит от величины амплитуды переменного давления. При этом считают, что его максимальный размер не превышает резонансного размера пузырька для соответственной частоты ультразвука [19, 24, 25].

Если считать, что радиус пузырька резонансного размера определяется выражением [26]

$$R = 1 / \omega [3\gamma / \rho \cdot (P_A + 2\sigma / R)]^{1/2},$$

где ω — частота возбуждения, ρ — плотность жидкости, γ — отношение удельных теплоемкостей для газа в пузырьке, σ — поверхностное натяжение, P_A — гидростатическое давление, или в упрощенном виде для воздушного пузырька в воде при атмосферном давлении — соотношением: $R = 0,328 / f$ (см.) * (частота в кгц), то например, для частоты 22 кгц радиус резонансного пузырька составит около 0,15 мм. Таким образом, при работе на этой частоте максимальный размер кавитирующего пузырька может иметь величину такого порядка. В работах [20, 24] приводится графическая зависимость максимального радиуса кавитирующего пузырька R_m от частоты ω (фиг. 4).

Рассматривая приведенные данные о кавитационных зародышах и кавитирующих полостях, можно отметить тот факт, что на определенной частоте возбуждения при определенной амплитуде переменного давления (выше пороговой)** в кавитационном процессе участвуют зародыши только определенного размера, или близкие по размерам. Кроме того, при определенной амплитуде переменного давления максимальный размер одинаков или близок для всех кавитирующих полостей. По всей вероятности, этим фактом и можно объяснить весьма однородный состав дисперсной фазы, образованной такими возмущениями.

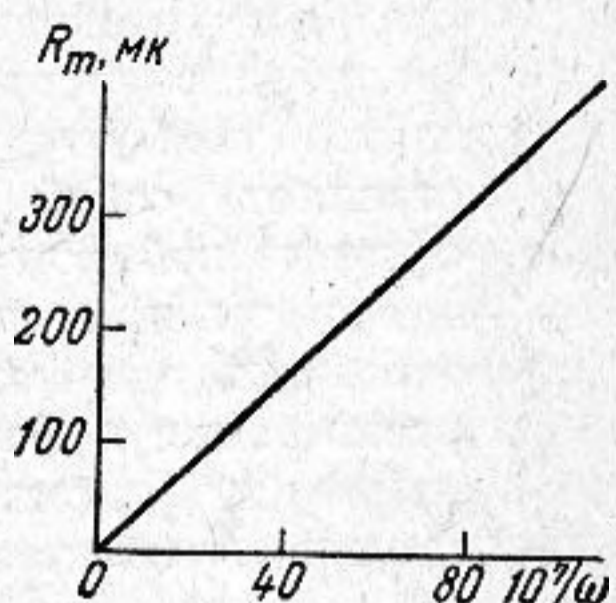
С ростом интенсивности ультразвука растет количество зародышей, способных кавитировать, чему соответствует интенсификация процесса образования эмульсии, связанная с увеличением числа локальных центров перехода жидкости в дисперсное состояние. При этом, как уже отмечалось, размер частиц исходной дисперсной фазы эмульсии не зависит от интенсивности ультразвука.

Такое положение, на наш взгляд, можно объяснить следующим образом: для кавитационного процесса при использовании сравнительно не-

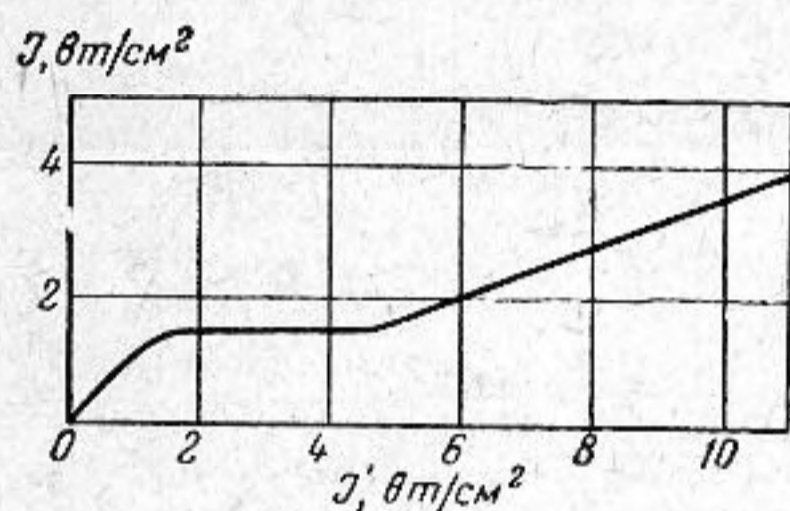
* Величина $2\sigma / R$ мала по сравнению с P_A и учитывается лишь для малых пузырьков с собственной частотой выше 100 кгц.

** Для поддержания кавитации требуется интенсивность ультразвука примерно в полтора раза меньше, чем для ее возбуждения [18].

большого диапазона значений интенсивности, энергия кавитирующего пузырька почти не зависит от интенсивности ультразвука [29, 30] *. При увеличении интенсивности растет лишь число кавитирующих полостей [29]. Это подтверждается результатами, полученными в работе [31] и представленными на фиг. 5. Согласно данным этой работы, с возникновением кавитации и дальнейшим ее развитием с ростом интенсивности на преобразователе I^1 действительная интенсивность ультразвука I , имеющая место в жидкости, начиная с ее определенного значения (близкого к пороговому), остается неизменной. Это связано с соответственным уменьше-



Фиг. 4



Фиг. 5

нием акустического сопротивления среды из-за увеличения ее «рыхлости» с развитием кавитации. Такое положение наблюдалось в интервале значений интенсивности ультразвука на преобразователе от 2 до 5 $вт/см^2$.

Если учесть, что приведенные в работе [31] результаты были получены при использовании преобразователя НЭЛ-4, т. е. того же, что и использованный нами при работе на частоте 22 $кГц$ [1—6], то станет очевидным, что в кавитационном режиме получение эмульсии проводилось фактически в интервале интенсивностей, несколько превышающем 2 $вт/см^2$ **. Отсюда понятно, что при таких интенсивностях, превышающих лишь на 1—2 $вт/см^2$ кавитационный порог, энергию кавитирующей полости можно практически считать неизменной.

Интересно отметить, что этому интервалу интенсивностей соответствует полученная [6] нами линейная зависимость увеличения скорости процесса образования эмульсии (фиг. 2). Кстати отметим, что скорость выхода йода [8] и скорость эрозии твердых материалов [32] так же изменяются почти линейно с ростом интенсивности ультразвука. Известно, что эти процессы протекают в акустическом поле только при наличии кавитации.

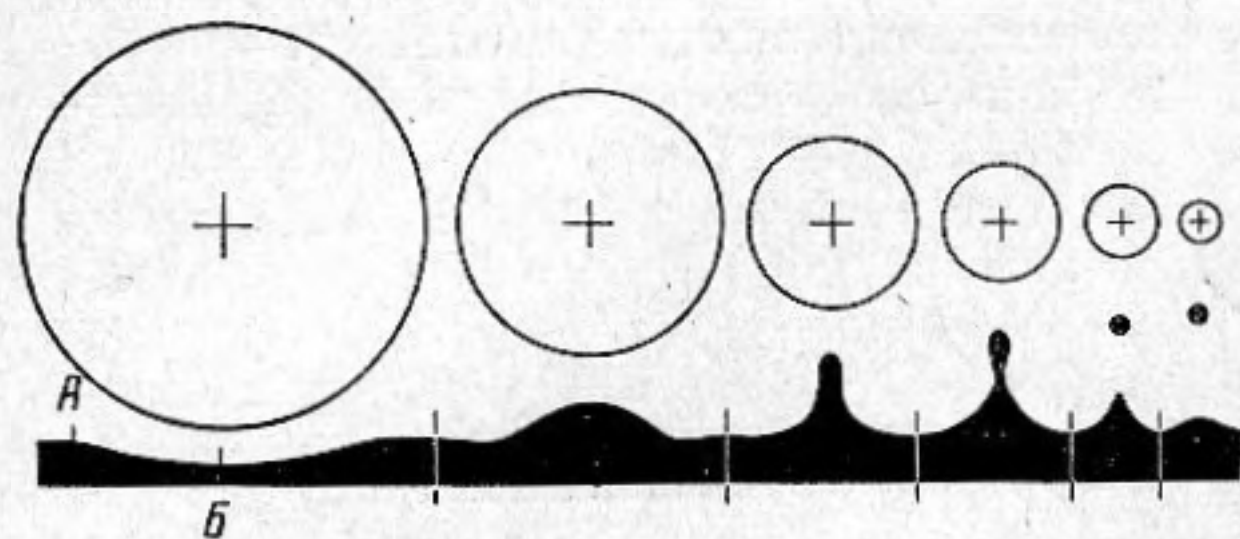
Таким образом, проведенная аналогия еще раз подтверждает, что образование эмульсии в акустическом поле вызывается возмущениями кавитационного характера ***. Вполне естественно считать в этом случае, что зависимости, полученные при исследовании процесса образования эмульсии, могут характеризовать и кавитационный процесс, а сам метод получения эмульсии может служить косвенным методом для изучения кавитации.

* Такая зависимость становится ощутимой при работе с высокими значениями интенсивности ультразвука порядка $квт/см^2$ (например, на частоте 511 $кГц$ [27, 28]). Энергия кавитирующей полости достигает максимума при значении $\tau = \frac{1}{2} T$, где τ — полное время захлопывания пузырька, а T — период колебания [19, 24, 27]. Аналогичное положение можно создать при постоянной амплитуде переменного давления путем подбора соответствующей частоты [19, 24].

** Заметим, что приведенные в работе [31] данные отражают обычный режим при работе с магнитострикционными преобразователями.

*** Под возмущением в более широком смысле слова, независимо от того, существует ли оно в форме резонансного пузырька или кавитирующей полости мы понимаем пузырек, имеющий две четко выраженные фазы: фазу расширения и фазу захлопывания (сокращения).

Приведенные выше рассуждения позволяют высказать в самых общих чертах гипотезу о механизме перехода жидкости в дисперсное состояние. В основу предлагаемой гипотезы легли следующие положения: 1) переход жидкости в дисперсное состояние совершается в результате действия локальных возмущений, возникающих у межфазной границы исходных жидких фаз; 2) переход одной из исходных жидкостей в дисперсное состояние



Фиг. 6

вызывается возмущениями, действующими у межфазной границы раздела со стороны другой жидкости, соответствующей дисперсионной средой; 3) возмущение представляет собой пузырек сферической формы, имеющий в течение периода, в основном, две фазы: фазу расширения и фазу захлопывания (сокращения)*;

4) максимальный размер такого пузырька значительно превышает размер частички дисперсионной фазы ($R_m \gg r$).

Согласно таким предпосылкам, логично предположить, что переход жидкости в дисперсное состояние совершается в фазе захлопывания пузырька, так как, во-первых, только в этой фазе направление действия возмущения совпадает с направлением перехода жидкости с межфазной границы раздела в дисперсное состояние; во-вторых, с энергетической точки зрения, большая работа, производимая в жидкости и проявляющаяся в виде кинетической энергии, совершается в фазе захлопывания пузырька. Последнее объясняется тем, что фазы расширения и захлопывания несимметричны по времени [31—33] — время захлопывания пузырька значительно меньше времени его расширения. Так, например, согласно работе [33] для частоты 7 кгц период расширения относится к периоду сжатия приблизительно, как 5 : 1. К тому же энергия в стадии захлопывания концентрируется во все уменьшающемся объеме. При захлопывании пузырька радиальная скорость, направленная к центру пузырька, может достигать очень больших значений, превосходящих скорость звука. Если учесть, что эта скорость определяет величину кинетической энергии, то понятно, что последняя в фазе захлопывания может принимать большие значения**.

На основании вышесказанного механизм перехода жидкости в дисперсное состояние представляется нам следующим образом (фиг. 6). При расширении пузырька у межфазной поверхности раздела исходных жидкостей в последней образуется «вмятина». В последующей фазе сокращения стенки пузырька радиально сходятся к его центру, увлекая за собой жидкость. При этом необходимо отметить, что максимальный захват диспергируемой жидкости имеет место в начальный период захлопывания пузырька, когда радиальная скорость движения его стенок минимальна. С уменьшением радиуса пузырька увлекающее действие на диспергируемую жидкость уменьшается, но скорость сокращения стенок увеличивает-

* Для кавитирующей полости в конце фазы захлопывания характерно образование ударной волны (или цуга ударных волн).

** Заметим, что при захлопывании переход энергии в ударную волну происходит с потерями из-за того, что, во-первых, захлопывающийся пузырек в конце стадии аннигиляции может распасться на большое количество мелких пузырьков, захлопывающихся самостоятельно и не одновременно, т. е. ударные волны излучаются в течение определенного промежутка времени [35]; во-вторых, в реальных условиях (особенно это относится к газовой кавитации) содержащийся в пузырьке газ оказывает демпфирующее действие на конечной стадии захлопывания, поэтому часть кинетической энергии переходит в тепловую.

ся. Соотношение между изменением радиуса R и скоростью сокращения стенок пузырька V в предположении, что последний захлопывается полностью, представлено графически на фиг. 7.

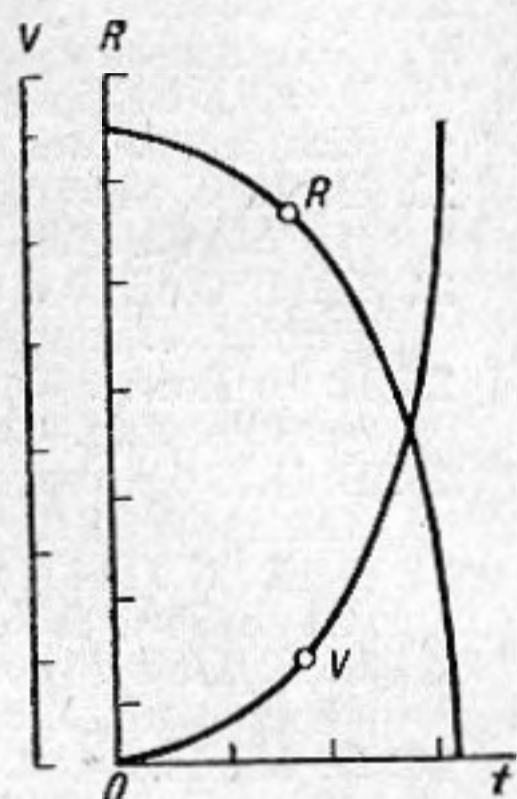
Рассмотрим движение жидкости, находящейся со стороны межфазной границы раздела, внешней по отношению к рассматриваемому пузырьку и испытывающей увлекающее действие стенок такого пузырька.

Можно отметить, что из двух зон А и Б, более выгодные условия, с энергетической точки зрения, имеют место в зоне Б. Так, в начальный момент стадии захлопывания пузырька, помимо одинакового действия на эти зоны, оказываемого его стенками, в этих зонах будут приложены разные по направлению силы, вызванные поверхностным натяжением, стремящиеся сократить деформированный участок поверхности. В зоне А равнодействующая сила поверхностного натяжения имеет направление, противоположное действию стенок пузырька. В зоне же Б равнодействующая сила поверхностного натяжения совпадает с направлением действия стенок пузырька. Поэтому в зоне Б диспергируемая жидкость получает дополнительное ускорение в своем движении вслед за стенками сокращающегося пузырька. Проходя положение равновесия для сил поверхностного натяжения, жидкость в зоне Б снова оказывается в преимущественном положении с точки зрения захвата, так как, находясь на меньшем расстоянии от центра пузырька по сравнению с зоной А, она испытывает большее увлекающее действие его сокращающихся стенок. Кроме того, она по инерции продолжает свое движение, вызванное действием сил поверхностного натяжения. В результате такого движения на межфазной поверхности образуется гребень, аналогичный гребню поверхностно-капиллярной волны, направленный в сторону захлопывающегося пузырька. На последней стадии захлопывания пузырька с вершины такого гребня и происходит каплеобразование.

Автор выражает глубокую признательность П. А. Ребиндеру и Л. Д. Розенбергу за обсуждение полученных результатов и ряд полезных советов и замечаний.

ЛИТЕРАТУРА

1. С. А. Недужий. К вопросу исследования зависимости процесса образования эмульсии от интенсивности ультразвука. *Акуст. ж.*, 1961, 7, 1, 99—100.
2. С. А. Недужий. О состоянии дисперсной фазы эмульсии в процессе ее образования в акустическом поле. *Акуст. ж.*, 1962, 8, 4, 481—482.
3. С. А. Недужий. Влияние интенсивности ультразвука на состояние дисперсной фазы эмульсии в момент ее образования. *Акуст. ж.*, 1961, 7, 2, 265—266.
4. С. А. Недужий. Влияние частоты ультразвука на исходный состав дисперсной фазы эмульсии. *Акуст. ж.*, 1963, 9, 2, 241—243.
5. С. А. Недужий. Некоторые особенности процесса образования эмульсии под действием звуковых и ультразвуковых колебаний. *Обзор. Акуст. ж.*, 1961, 7, 3.
6. С. А. Недужий. К вопросу о зависимости процесса образования эмульсии от интенсивности ультразвука. *Акуст. ж.*, 1963, 9, 61, 125—126.
7. С. А. Недужий. Исследование процесса образования эмульсии, вызываемого действием звуковых и ультразвуковых колебаний. *Обзор. Акуст. ж.*, 1961, 7, 3, 275—294.
8. А. Э. Крауфорд. *Ультразвуковая техника*. М., ИЛ, 1958.
9. Л. Бергман. *Ультразвук и его применение в науке и технике*. М., ИЛ, 1957.
10. M. M. Degrois, V. Badilian. Relation dans certains liquides ultrasonores entre la luminescence et la relaxation des cavitations des gaz et de vapeur. K. 44. Fourth International Congress on Acoustics. Copenhagen, 21—28 august, 1962, 1—4.
11. R. O. Prudhomme, P. Grabar. De l'action chimiques des ultrasons sur certaines solutions aqueuses. *J. Chim. Phys.*, 1949, 46, 149, 323.
12. A. Weissler, H. W. Cooper, S. Snyder. Chemical effect of ultrasonic waves. oxidation of potassium iodide solution by carbon tetrachloride. *J. Amer. Chem. Soc.*, 1950, 72, 4, 1769—1775.
13. С. А. Недужий. Исследование процесса образования эмульсии, вызываемого действием ультразвуковых колебаний. (Канд. диссертация). М., 1963.



Фиг. 7

14. M. Strasberg. Onset of ultrasonic cavitation in tap water. *J. Acoust. Soc. America*, 1959, 31, 2, 163—176.
15. G. W. Willard. Ultrasonically induced cavitation in water: a step by step process. *J. Acoust. Soc. America*, 1953, 25, 667—686.
16. М. Г. Сиротюк. Методы получения ультразвуковых полей высокой интенсивности и изучение протекающих в них кавитационных явлений. (Канд. диссертация). Киевский политехнический институт, 1961.
17. H. B. Briggs, J. B. Johnson, W. P. Mason. Properties of liquids at high sound pressure. *J. Acoust. Soc. America*, 1947, 19, 664—677.
18. W. Connolly, F. E. Fox. Ultrasonic cavitation in thresholds in water. *J. Acoust. Soc. America*, 1954, 26, 5, 843—848.
19. B. E. Noltingk, E. A. Neppiras. Cavitation produced by ultrasonics. Theoretical conditions for the onset of cavitation. *Proc. Phys. Soc.*, 1951, B64, 1032—1038.
20. B. E. Noltingk. The effects of intense ultrasonic in liquids. *Encyclop. Phys.*, 1962, 11/2, 256—287.
21. W. J. Galloway. An experimental study of acoustically induced cavitation in liquids. *J. Acoust. Soc. America*, 1954, 26, 5, 843—857.
22. H. H. Rust. Untersuchungen zur klärung einiger chemischer Wirkungen des Ultraschalls. *Ang. Chem.*, 1952, 62, 162.
23. В. И. Образцов. К вопросу о механизме ультразвуковой очистки. II кавитация. Сб. тр. МОПИ, вып. 13, М., 1961, 343—356.
24. B. E. Noltingk, E. A. Neppiras. Cavitation produced by ultrasonics. *Proc. Phys. Soc.*, 1950, B63, 674.
25. N. H. Langton, P. Vaughan. Cavitation and ultrasonic degradation of high polymers. *Brit. J. Appl. Phys.*, 1962, 13, 478—482.
26. M. Minnaert. On musical air—bubbles and the sounds of running water. *Phil. Mag.*, 1933, 16, 7, 235.
27. М. Г. Сиротюк. О поведении кавитационных пузырьков при больших интенсивностях ультразвука. *Акуст. ж.*, 1961, 7, 4, 499—501.
28. М. Г. Сиротюк. О балансе энергии в концентраторе, предназначенном для получения ультразвука высокой интенсивности. *Акуст. ж.*, 1960, 6, 3, 410—411.
29. R. Esche, P. Wenke. Moderne Ultraschallanlagen für Reinigung, Entgasung und Dispergierung. *Elektrotechn. Zs.*, 1960, B5, 97—104.
30. T. Hirose, M. Okuyama. Mechanics on the Cavitation produce by ultrasonics (I, II) fundamental equations. *J. Acoust. Soc. Japan*, 1957, 13, 1, 7—13; 14—20.
31. Л. Д. Розенберг, М. Г. Сиротюк. Об измерении звука в жидкости при наличии кавитации. *Акуст. ж.*, 1960, 6, 4, 478—481.
32. L. D. Rosenberg. Untersuchungen der Physikalische Prozesse bei einigen industriellen Anwendungen des Ultraschall. *Proceedings of the Third International Congress on Acoustics*. Stuttgart, 1959, A.—L. N. Y., 1961, 2, 1271—1276.
33. A. T. Ellis. Techniques for pressure pulse measurements and high-speed photography in ultrasonic cavitation. London, H. M. S. O., 1956, 8—1—8—32, Discuss. C1—C3.
34. Л. Д. Розенберг, В. Ф. Казанцев. О физике ультразвуковой обработки. *Станки и инструменты*, 1959, 5, 20—22.
35. J. Schmid. Kinematographische Untersuchung der Einzelblasenkavitation. *Acustica*, 1959, 9, 4, 321—326.

Н.-и. кинофотоинститут
Москва

Поступила в редакцию
17 января 1964 г.