

УДК 534.232

## ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ЭМУЛЬГИРОВАНИЯ В МНОГОЧАСТОТНОМ АКУСТИЧЕСКОМ ПОЛЕ

О. В. СУХАРЬКОВ

*Одесская национальная академия связи имени А. С. Попова**Получено 24.11.2009*

Статья посвящена проблеме акустического эмульгирования несмешивающихся жидкостей. При этом используются струйные прямоточные гидродинамические излучатели со ступенчатым препятствием, в частотном спектре которых имеется ряд кратных и некратных гармоник. Представлены результаты экспериментальных исследований по приготовлению эмульсий. Проведено сравнение качества эмульсий, полученных различными способами: механическим перемешиванием; с помощью магнитострикционного преобразователя; с помощью одного гидродинамического излучателя при атмосферном давлении и двух гидродинамических излучателей с разными частотными диапазонами при избыточном статическом давлении. Показано преимущество последнего способа для достижения высокой дисперсности эмульсий.

Статтю присвячено проблемі акустичного емульгування незмішуваних рідин. При цьому використовуються струменеві прямоточні гідродинамічні випромінювачі зі східчастою перешкодою, в частотному спектрі яких є ряд кратних і некратних гармонік. Представлені результати експериментальних досліджень з приготування емульсій. Проведено порівняння якості емульсій, одержаних різними способами: механічним перемішуванням; за допомогою магнітострикційного перетворювача; за допомогою одного гідродинамічного випромінювача при атмосферному тиску і двох гідродинамічних випромінювачів з різними частотними діапазонами при надлишковому статичному тиску. Показано перевагу останнього способу для досягнення високої дисперсності емульсій.

The paper deals with problem of acoustic emulsifying of the immiscible liquids. In doing so, the direct-flow hydrodynamic radiators with circular nozzle and step obstacle are used, which frequency spectrum contains a series of multiple and aliquant harmonics. The results of the experimental studying of emulsion preparation have been represented. We have compared the qualities of emulsions obtained with different methods: mechanical stirring; blending by magnetostrictive transducer; using of one hydrodynamic radiator at the atmospheric pressure and two hydrodynamic radiators with different frequency ranges at static overpressure. The advantage of the last method for obtaining of high-dispersion emulsions has been shown.

### ВВЕДЕНИЕ

Для машиностроения, химической, пищевой промышленности и пр. актуальным остается получение высококачественных эмульсий из несмешивающихся жидкостей. На практике для этого обычно применяют различные перемешивающие устройства типа механических мешалок, коллоидных мельниц, центробежных эмульгаторов и т. д. Однако полученные таким путем жидкие смеси по качеству значительно уступают эмульсиям, приготовленным с помощью интенсивных колебаний звукового и ультразвукового диапазонов частот, которые характеризуются равномерностью по гранулометрическому составу, наибольшей дисперсностью, весовой концентрацией и устойчивостью. В эмульгирующих устройствах могут применяться различные типы излучателей. Так, магнитострикционные или пьезоэлектрические преобразователи создают ультразвуковое поле в сосуде с обрабатываемыми жидкостями. Альтернативой им могут служить гидродинамические излучатели (ГДИ) [1–3].

Производительность ультразвукового эмульгирования с помощью магнитострикционных и пьезоэлектрических преобразователей может составлять десятки и сотни литров эмульсии в час, однако сопутствующие энергетические затраты существенно выше, чем при использовании ГДИ. Поэтому в настоящее время данный способ используют только для исследовательских целей или в особо ответственных случаях – при эмульгировании небольших объемов дорогостоящих веществ [3].

В промышленных условиях наиболее перспективны акустические установки, снабженные ГДИ вихревого типа и ГДИ с пульсирующей кавитационной областью, образующейся между соплом и препятствием. Такие эмульгирующие устройства просты в изготовлении и эксплуатации, позволяют достигнуть больших производительностей – порядка тысяч и десятков тысяч литров эмульсии в час [2].

Акустическое эмульгирование происходит в первую очередь под влиянием кавитации, условия возникновения и протекания которой и определяют характеристики процесса. В частности, они зависят от интенсивности и частоты звука, температуры, гидростатического давления, наличия растворенных газов и т. п. [2].

Проведенные ранее экспериментальные исследования

дования показали, что прямоочные ГДИ с кольцевым соплом и ступенчатым препятствием являются мощными широкополосными источниками звука. При этом повышение гидростатического давления в герметичной емкости позволяет регулировать частотные характеристики данных излучателей [4]. В настоящее время один из новых перспективных способов акустического эмульгирования состоит в одновременном введении в жидкость акустических колебаний различных частот. Это позволяет регулировать дисперсность капель получаемых эмульсий в широких пределах [3, 5].

В связи с этим представляет интерес исследование процесса эмульгирования в режиме избыточного статического давления с использованием двух прямоочных гидродинамических излучателей, имеющих разные частотные диапазоны.

## 1. МЕХАНИЗМ АКУСТИЧЕСКОГО ЭМУЛЬГИРОВАНИЯ

Единой теории, описывающей механизм акустического эмульгирования, в настоящее время не существует. Предполагается, что в основе механизма образования эмульсий лежит отрыв мельчайших капель эмульгируемой жидкости от ее основной массы под действием захлопывающихся на границе раздела фаз кавитационных пузырьков. Ряд исследователей процесс эмульгирования связывает преимущественно с внедрением одной жидкости в другую и разрывом частиц эмульгируемых компонентов за счет сил, больших по абсолютной величине и различных по направлению в разных точках акустического поля. Не исключено, что причинами диспергирования жидкостей в ультразвуковых полях являются значительное растягивание капель эмульгируемой жидкости до неустойчивых жидких цилиндров критической длины и интенсификация их распада на ряд очень мелких капель. Таким образом, большинство исследователей основную роль в механизме ультразвукового эмульгирования отводят кавитации и акустическим течениям. Именно поэтому интенсивность ультразвука и его частота, продолжительность ультразвуковой обработки, наличие в жидкой фазе растворенных поверхностно-активных веществ (ПАВ) и газов, а также температура среды и тип эмульгирующего устройства – наиболее существенные факторы, влияющие на диспергирование жидкостей [3].

Эмульгирование начинается, когда интенсивность  $I$  ультразвука превышает некоторое пороговое значение  $I_{п}$ , ниже которого процесс не протекает. Например, для систем “масло–вода”  $I_{п}$

на частоте 25 кГц лежит в пределах от десятых долей до единиц Вт/см<sup>2</sup>. Эта величина снижается, если эмульгирование протекает вблизи твердой поверхности, инициирующей образование кавитации. При увеличении интенсивности ультразвука ( $I > I_{п}$ ) предельные весовые концентрации эмульсий различных жидкостей повышаются, а продолжительность эмульгирования сокращается. С ростом частоты увеличивается необходимая для эмульгирования интенсивность ультразвуковых колебаний, при этом уменьшается скорость образования эмульсий и растет дисперсность эмульсии.

На качестве эмульсий существенно сказывается продолжительность ультразвуковой обработки. Кратковременное акустическое воздействие дает недостаточное измельчение компонентов, эмульсии получаются малоустойчивыми и быстро расслаиваются. В то же время, длительное ультразвуковое диспергирование также может привести к снижению устойчивости эмульсий и коагулированию самых малых частиц дисперсной фазы. Механическое эмульгирование зачастую проводят в присутствии стабилизаторов (ПАВ), назначение которых состоит в уменьшении межфазного поверхностного натяжения. Молекулы ПАВ адсорбируются на поверхности капель эмульсии и препятствуют их объединению. Ультразвуковое эмульгирование, как правило, обеспечивает высокую устойчивость эмульсий без добавления стабилизаторов. Тем не менее, исследователями обоснована целесообразность ультразвукового эмульгирования аполярных флотационных реагентов в водных растворах неионогенных ПАВ, сульфатов, сульфанатов, а также солей жирных кислот и ряда других гетерополярных собирателей. Последние адсорбируются на поверхности капель аполярного реагента, причем их полярные группы ориентированы в полярную фазу – воду [3].

С увеличением времени озвучивания концентрация эмульсии возрастает, достигая некоторого предельного значения. Существование предельной концентрации обусловлено одновременным протеканием противоположного процесса – акустической коагуляции, а также изменением в ходе эмульгирования условий для возникновения кавитации. Выражение, описывающее кинетику ультразвукового эмульгирования с учетом протекания коагуляции имеет вид

$$\frac{\partial(VC)}{\partial t} = A\alpha - \beta VC^n,$$

где  $V$  – объем рассматриваемой эмульсии;  $C$  – концентрация;  $A$  – площадь границы раздела двух

жидких фаз;  $\alpha$  и  $\beta$  – параметры, зависящие от акустического поля, свойств границы раздела и других условий эксперимента;  $A\alpha$  – скорость образования дисперсной фазы;  $\beta VC^n$  – скорость коагуляции;  $n$  – показатель коагуляции, равный числу взаимодействующих частиц. Образование дисперсной фазы облегчается с понижением вязкости исходных компонентов. С уменьшением межфазного натяжения снижается пороговое значение интенсивности  $I_{п}$ , а при заданных надпороговых значениях  $I$  можно получать более концентрированные эмульсии [1, 2].

При одновременном введении в жидкость акустических колебаний различных частот возрастают эрозионная активность области кавитации, турбулентность и скорость акустических потоков, т. е. факторы, оказывающие наибольшее влияние на процесс образования эмульсий. Эмульгирование труднорастворимых в воде веществ и реагентов в акустическом поле с несколькими частотами позволяет регулировать дисперсность капель получаемых эмульсий в широких пределах, начиная с (0.1...0.2) мкм. Одновременно возрастают предельная весовая концентрация и устойчивость эмульсий [3, 5].

## 2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА И МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ИССЛЕДОВАНИЙ

На рис. 1 изображен источник акустических колебаний – прямооточный ГДИ с пульсирующей кавитационной областью, образующейся между соплом и ступенчатым препятствием [4, 6]. ГДИ состоит из выполненного совместно с герметичной крышкой корпуса 1, штуцера 2 для подвода рабочей жидкости, обтекателя 3, ступенчатого цилиндрического препятствия 4, кольцевой насадки 5 и контргайки 6. Основным типоразмером прямооточного ГДИ служит отношение  $a/D_c$ , где  $a$  – ширина щели кольцевого сопла, а  $D_c$  – его средний диаметр. Включение в конструкцию гидродинамического излучателя кольцевой насадки 5 обеспечивает повышение интенсивности акустических колебаний при размещении излучателя во внутренних полостях объемов, соизмеримых с размерами его зоны звукообразования [7].

Для исследования процесса эмульгирования в акустическом поле двух прямооточных гидродинамических излучателей была разработана экспериментальная установка, изображенная на рис. 2. Она содержит герметичную рабочую камеру 2, выполненную в виде цилиндра; емкость для эмульсии 9; насосы 13 и 10 с регулируемым ра-

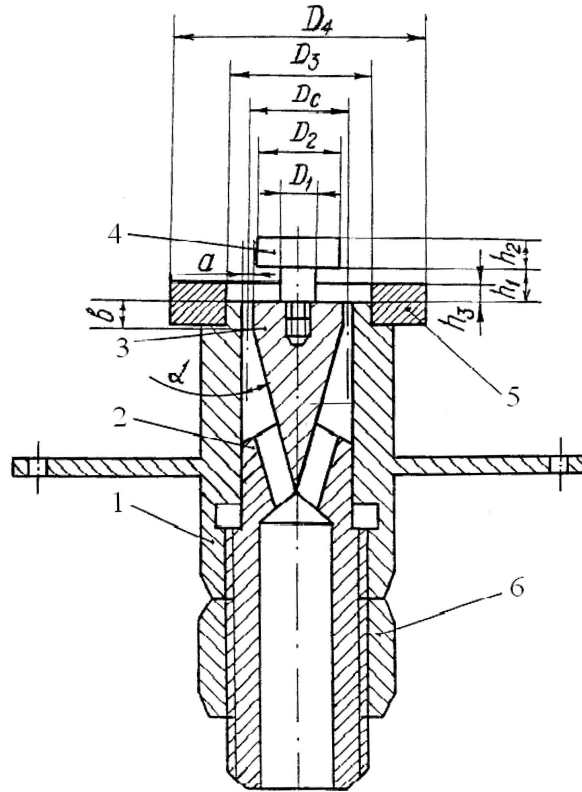


Рис. 1. Схема прямооточного гидродинамического излучателя

сходом, обеспечивающие питание высокочастотного 1 и низкочастотного 4 гидродинамических излучателей; систему трубопроводов. Оба гидродинамических излучателя 1 и 4 установлены в вертикальной плоскости в торцах камеры 2 друг напротив друга. Манометры 5 и 14 используются для контроля давления нагнетания жидкости в сопла излучателей 1 и 4. Для выпуска обработанной жидкости из камеры 2 герметичная крышка излучателя 4 снабжена штуцером 6, регулируемым вентилем 7 и патрубком 8. Избыточное статическое давление в рабочей камере 2 контролируется манометром 3. Емкость для эмульсии 9 снабжена реверсивным насосом 12 с вентилем 11. Герметизация камеры 2 обеспечивается болтами и уплотнительными кольцами 15 и 16. С учетом возможных агрессивных свойств рабочей жидкости камера 2, гидродинамические излучатели 1 и 4 изготавливаются из нержавеющей стали, например, Х18Н10Т.

Следует отметить одну особенность прямооточных ГДИ, связанную с их использованием в цилиндрической емкости. Средний диаметр кольцевого сопла низкочастотного излучателя 4 выбирается в интервале (0.3...0.4) внутреннего диаметра

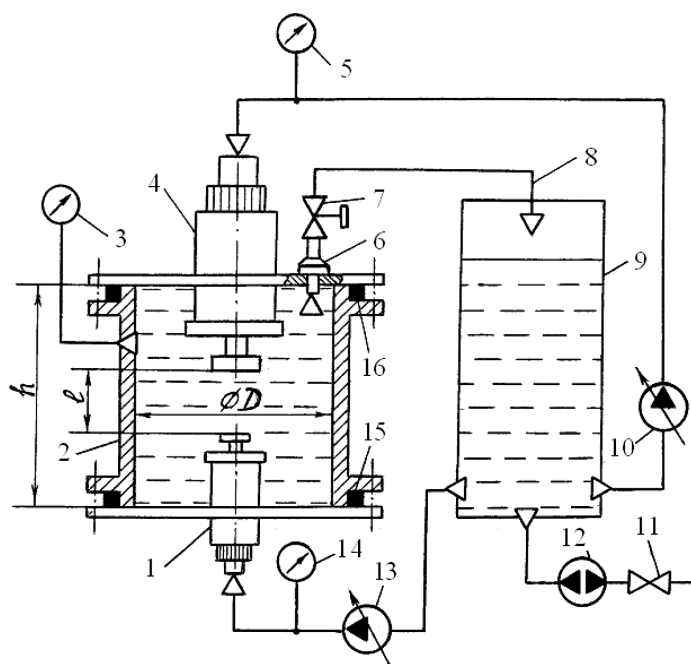


Рис. 2. Схема экспериментальной установки для приготовления эмульсий высокой дисперсности

$D$  камеры и в два и более раз больше среднего диаметра кольцевого сопла высокочастотного излучателя 1. Высота  $h$  и внутренний диаметр  $D$  рабочей камеры связаны соотношением  $h = (1.0 \dots 1.2)D$ , расстояние  $l$  между крайними торцевыми сечениями излучателей составляет  $l = (0.3 \dots 0.5)D$  (см. рис. 2). Известно, что зона развитой кавитации прямоточных ГДИ, она же зона звукообразования, представляет собой тороидальную область, размеры которой составляют  $(1.3 \dots 1.6)$  среднего диаметра кольцевого сопла  $D_c$  [10, 11]. Поэтому указанные геометрические параметры рабочей камеры и расстояние между крайними торцевыми сечениями излучателей позволяют формировать в центре камеры концентрированную область развитой кавитации. Остальные размеры гидродинамических излучателей 1 и 4 следует оптимизировать согласно проведенным ранее экспериментальным исследованиям [4, 8, 9, 11]. В качестве низкочастотного ГДИ использовался излучатель типоразмера  $a/D_c = 1/52$  с частотой основной гармоники  $f_0 = 0.53$  кГц. В качестве высокочастотного ГДИ служил излучатель типоразмера  $a/D_c = 1/13$  с частотой основной гармоники  $f_0 = 4.65$  кГц.

Установка для приготовления эмульсий работает следующим образом. С помощью реверсивного насоса 12 и вентиля 11, емкость 9 заполняе-

тся эмульсией низкой дисперсности (7...10) мкм, приготовленной с помощью лопастной мешалки (скорость вращения  $n = 133$  об/с). После этого при открытом вентиле 7 включаются насосы 10 и 13 и обрабатываемая жидкость из емкости 9 через ГДИ 1 и 4 начинает поступать в рабочую камеру 2. В момент начала выхода эмульсии из патрубка 8 в емкость 9 за счет изменения расхода насосов 10 и 13, а также путем регулировки вентилем 7 устанавливается оптимальный режим работы ГДИ 1 и 4 при заданном избыточном статическом давлении ( $\Delta P_{ст} = 0.15$  МПа) внутри камеры 2. При достижении оптимального режима работы установки, который контролируется манометрами 3, 5 и 14, начинается процесс акустического эмульгирования.

Экспериментальная установка обеспечивает возможность однократной и многократной обработки эмульсий в мощном многочастотном акустическом поле двух гидродинамических излучателей. Для приготовления эмульсий дисперсной фазой служили различные масла и эмульсол, а дисперсионной средой – вода. Исследовались 5 и 10 % эмульсии, полученные в многочастотном акустическом поле при температурах 20 и (45...50)°С.

После окончания процесса акустического эмуль-

гирования, продолжительность которого задавалась с помощью реле времени, электропитание насосов 10 и 13 автоматически отключалось. С помощью реверсивного насоса 12 и вентиля 11 отбирались пробы готовой эмульсии для определения ее стойкости к расслаиванию во времени. Для оценки дисперсности капли исследуемой эмульсии наносились на предметные стекла, накрывались покровным стеклом и фотографировались через микроскоп. Кадр делился на участки, в каждом из которых проводился подсчет частиц масла определенного диаметра  $d$ . При этом в каждом опыте подсчитывалось не менее 800 частиц. По результатам измерений строились зависимости распределения частиц по их размерам, выраженным в виде отношения суммы площадей  $S_i$  частиц определенного размера к площади  $S_k$  исследуемого кадра.

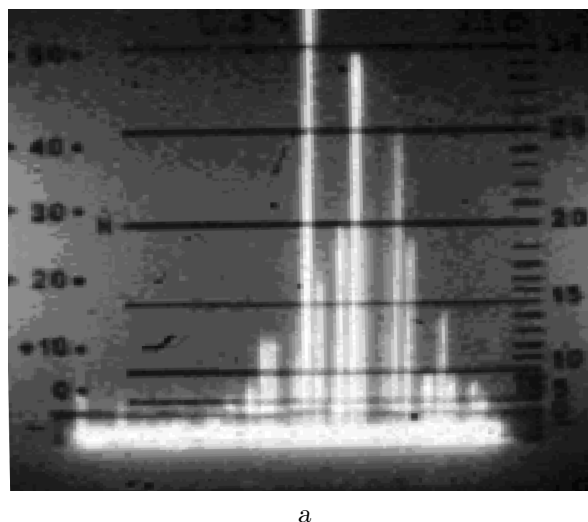
### 3. АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ ИССЛЕДОВАНИЙ

Разработанная установка реализует научно обоснованный способ ультразвукового эмульгирования в интенсивном многочастотном акустическом поле, в котором задействованы такие физические явления как развитая кавитация в режиме избыточного статического давления и мощные турбулентные течения в обрабатываемой жидкой среде [3, 4, 6–12].

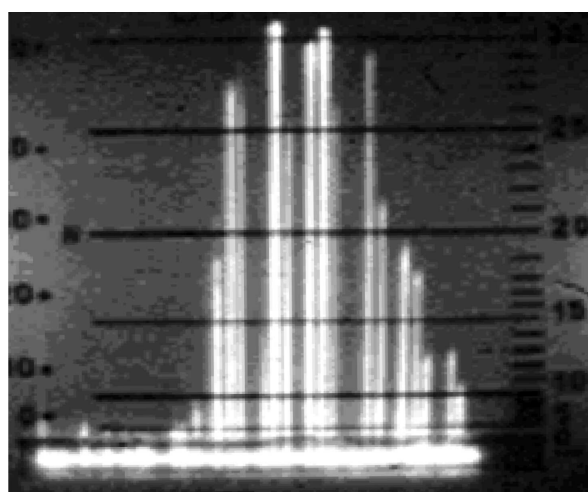
Преимуществом прямоочных гидродинамических излучателей [7], по сравнению с магнито-стрикционными преобразователями, является существенное снижение энергетических затрат, а также возникновение мощных турбулентных течений, способствующих разрыву частиц эмульгируемых компонент (их скорость в рабочей камере составляла (15...30) м/с). Кроме того, у прямоочных ГДИ [7] отсутствуют вибрационные элементы конструкции, что обеспечивает их долговременную службу.

Проведенные ранее исследования энергетических характеристик прямоочных ГДИ показали, что в диапазоне избыточных статических давлений от 0.01 до 0.25 МПа за счет подбора оптимальной скорости струи на выходе из кольцевого сопла в пределах (20...75) м/с можно повысить интенсивность акустического поля в зоне развитой кавитации примерно с 2 до 12 Вт/см<sup>2</sup> [10]. В ходе акустического эмульгирования в рабочей камере устанавливалось избыточное статическое давление  $\Delta P_{ст} = 0.15$  МПа, соответствующее максимуму акусто-гидродинамического КПД для прямоочных ГДИ [4].

Экспериментально установлено [3, 13], что дей-



а



б

Рис. 3. Спектр акустического сигнала, генерируемого в рабочей камере установки:

а – одним прямоочным ГДИ;  
б – двумя прямоочными ГДИ совместно

ствие нескольких акустических волн кратных или не кратных частот в процессах эмульгирования, диспергирования, очистки оказывается более эффективным, чем раздельное воздействие соответствующих моногармонических волн. В основе этого явления лежат два механизма. С одной стороны, образующиеся в мощном акустическом поле кавитационные пузырьки имеют радиусы, отличающиеся на два порядка и, соответственно, широкий диапазон резонансных частот. Поэтому использование волн различных частот способствует захлопыванию большего количества каверн. С другой стороны, при резонансе больших пульсирующих каверн на низких частотах происходит

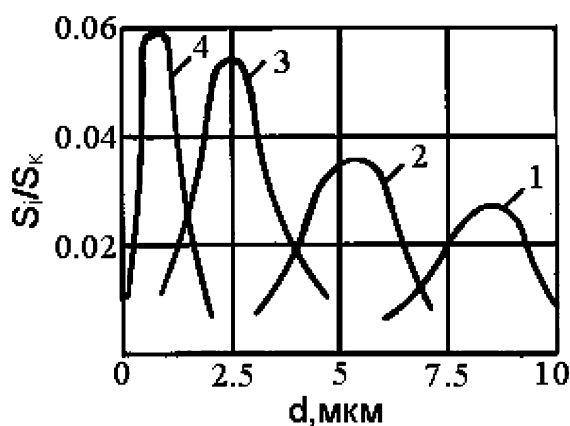


Рис. 4. Распределение по размерам частиц масла в воде для 10 % эмульсий для различных способов эмульгирования:

- 1 – с помощью лопастной мешалки ( $n = 133$  об/с);
- 2 – в акустическом поле магнитострикционного преобразователя одной частоты  $f = 20$  кГц [3];
- 3 – в акустическом поле одного прямооточного ГДИ при атмосферном давлении [12];
- 4 – в режиме оптимального гидростатического давления в акустическом поле двух прямооточных ГДИ

отщепление мелких сферических пузырьков, которые, резонируя на высоких частотах, создают дополнительные микроударные волны.

Гидродинамические излучатели с пульсирующей кавитационной областью способны генерировать акустические волны в широком частотном диапазоне – от 0.3 до 35 кГц [2, 14]. Таким образом, в дискретном спектре тональных сигналов имеется набор гармонических составляющих, частоты которых могут отличаться в десятки раз. При этом наиболее энергоемкая часть спектра данных излучателей связана с тремя первыми гармониками (рис. 3, а). В случае повышения статического давления энергоемкие гармонические составляющие смещаются в высокочастотную область спектра. В ходе экспериментов для низкочастотного ГДИ высокоамплитудными гармоническими составляющими были 0.53, 1.06 и 1.59 кГц, а для высокочастотного излучателя – 4.65, 9.30 и 13.95 кГц. Отметим также, что в связи с генерированием акустических волн двумя излучателями амплитуды высших гармоник (от 15 до 25 кГц) возрастают, что также вносит определенный вклад в интенсификацию процесса эмульгирования. На рис. 3, б представлена фотография спектра многочастотного акустического сигнала, генерируемого совместно двумя прямооточными ГДИ в оптимальном режиме.

Таким образом, разработанная установка ока-

зывается более эффективной по сравнению со случаем использования в качестве эмульгатора одного ГДИ [12]. Это можно объяснить наличием в акустическом поле, по крайней мере, шести высокоамплитудных гармоник. В результате вероятность захлопывания кавитационных пузырьков различных радиусов повышается, что усиливает кавитацию и делает воздействие акустического поля на обрабатываемую жидкую среду более эффективным.

Исследование процесса акустического эмульгирования показало, что эмульсия, приготовленная при температуре 20°C с одноразовым прокачиванием через рабочую камеру установки, оказалась довольно стойкой и расслаивалась на 80 % только через 10 суток. При этом размер большинства частиц масла составлял от 2 до 4 мкм. Более высокодисперсную эмульсию удалось получить при трехкратном ее прокачивании через два ГДИ.

С повышением температуры до (45...50)°C даже при одноразовом прокачивании образовывалась стойкая высокодисперсная эмульсия практически молочного цвета с доминированием частиц диаметром от 0.3 до 1.5 мкм. Первые признаки ее расслоения появлялись только через 30 суток. Многократное прокачивание эмульсии через рабочую камеру установки не оказало существенного влияния на ее качество. Отметим, что температурный диапазон (45...50)°C был выбран, исходя из условий работы ГДИ с пульсирующей кавитационной областью, – при температуре выше 50°C резко падает интенсивность генерируемого акустического сигнала [15], что отрицательно сказывается на качестве эмульсий.

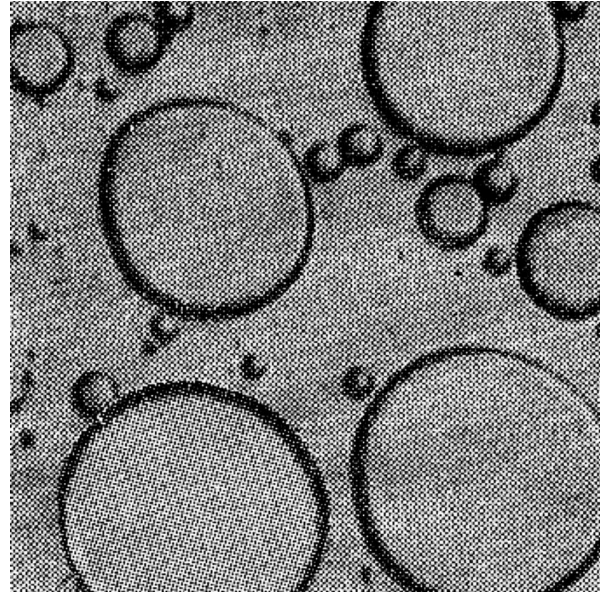
На рис. 4 представлено распределение по размерам частиц масла в воде для 10 % эмульсий, приготовленных разными способами. Анализ приведенных на графике кривых убеждает, что любое акустическое воздействие на обрабатываемую жидкую среду оказывает положительное влияние на качество эмульсии. Тем не менее, предпочтительнее следует отдать эмульгированию в многочастотном акустическом поле, созданном двумя работающими одновременно гидродинамическими излучателями. Именно при сочетании многочастотного спектра акустического сигнала и оптимального гидростатического давления в жидкости достигается наибольшая эрозионная активность кавитационной зоны в рабочей камере.

На рис. 5 для сравнения приведены микроструктуры эмульсий, приготовленных с помощью лопастной мешалки ( $n = 133$  об/с) и в многочастотном акустическом поле двух прямооточных ГДИ. Анализ показал, что если в первом слу-

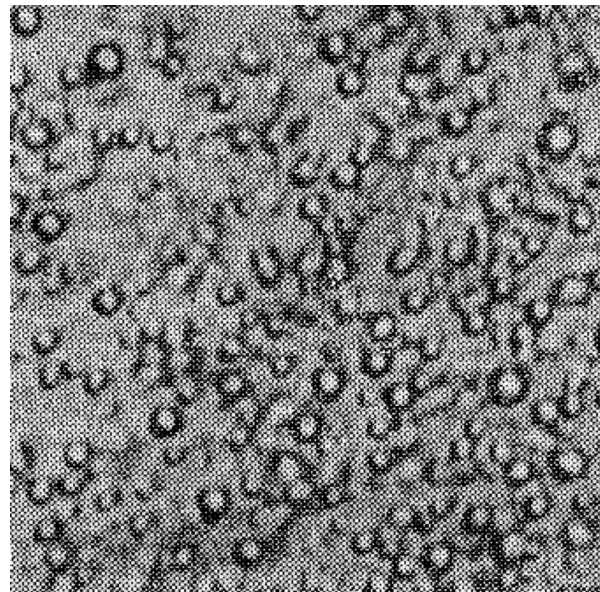
чае получена емульсія низкої дисперсності – (7...10) мкм, – то во втором дисперсность возросла практически на порядок – (0.3...1.5) мкм. Этот показатель сравним с результатом, полученным при использовании пар магнитострикционных преобразователей с резонансными частотами 20 кГц и 50 Гц или 1 МГц и 20 кГц [3]. Следует, однако, заметить, что продолжительность процесса эмульгирования в многочастотном акустическом поле двух прямооточных ГДИ в десятки раз меньше, чем при эмульгировании с использованием электроакустических преобразователей.

## ВЫВОДЫ

1. Экспериментально исследован процесс эмульгирования в режиме избыточного статического давления в интенсивном многочастотном акустическом поле двух прямооточных гидродинамических излучателей с пульсирующей кавитационной областью. Оценено качество приготовленных емульсий.
2. Установлено, что разработанный на основе двух прямооточных ГДИ эмульгатор обеспечивает получение высокодисперсных однородных стойких к расслаиванию водомасляных емульсий.
3. Проведено сравнение качества приготовленных емульсий с использованием гидродинамических и магнитострикционных преобразователей, а также механического перемешивания. Показано преимущество многочастотного акустического поля по сравнению с моногармоническим сигналом.



а



б

Рис. 5. Микроструктуры емульсий, приготовленных разными способами:

а – с помощью лопастной мешалки;

б – в многочастотном акустическом поле двух прямооточных ГДИ

1. Недужий С. А. Исследование процесса образования емульсий, вызываемого действием звуковых и ультразвуковых колебаний // Акуст. ж. – 1961. – 7, N 3. – С. 275-294.
2. Ультразвук: Маленькая энциклопедия / Под ред. И. П. Голяминой и др. – М.: Сов. энцикл, 1979. – 400 с.
3. Основы физики и техники ультразвука / Под ред. Б. А. Аграната. – М.: Высшая школа, 1987. – 352 с.
4. Сухарьков О. В. Оптимизация параметров прямооточного гидродинамического излучателя в условиях гидростатического давления // Акуст. вісн. – 2008. – 11, N 4. – С. 54-63.
5. Ультразвуковая установка / Шестовских А. Е. и др. – Пат. России. – N 2286216, МПК В01F 11/02. – 2006.
6. Дудзінський Ю. М., Сухарьков, О. В., Манічева Н. В. Модель прямооточного гідродинамічного випромінювача з кільцевим соплом і східчастою перешкодою // Акуст. вісн. – 2004. – 7, N 3. – С. 49-54.

7. Гидродинамическая излучающая система / Кортнев А. В., Назаренко А. Ф., Сухарьков О. В. – Авт. свид. СССР. – N 806153, МПК В06В 1/20. – 1981 // Бюл. N 7.

8. Сухарьков О. В. Акустические характеристики осесимметричных прямооточных гидродинамических излучателей // Наук. праці ОНАЗ ім. О. С. Попова. – 2005. – N 2. – С. 60-65.

9. Сухарьков О. В. Экспериментальное исследование акустических характеристик осесимметричных прямооточных гидродинамических излучателей // Наук. праці ОНАЗ ім. О. С. Попова.– 2006.– N 1.– С. 74–79.
10. Дудзинский Ю. М., Сухарьков О. В., Маничева Н. В. Энергетика прямооточного гидродинамического излучателя в условиях гидростатического давления // Акуст. вісн.– 2004.– 7, N 1.– С. 44–49.
11. Сухарьков О. В. Влияние гидростатического давления на энергетические характеристики прямооточного гидродинамического излучателя // Наук. праці ОНАЗ ім. О. С. Попова.– 2009.– N 1.– С. 70–77.
12. Назаренко А. Ф., Козовый С. И., Слиозберг Т. М., Назаренко А. А. Особенности акустического способа приготовления СОЖ и его применение в машиностроении // Вісн. Інж. акад. України.– 2001.– N 3.– С. 365–368.
13. Dezhkunov N. V., Francescutto A., Ciuti P. Enhancement of the conversion and concentration of energy in a multibubble cavitation zone // Proc. 16th Int. Sympos. on Nonlinear Acoustics.– Moscow, 2002.– P. 919–926.
14. Дудзінський Ю. М., Сухарьков О. В. Спектр звуку, генерованого зануреною осесиметричною струминною оболонкою // Мат. методи та фіз.-мех. поля.– 2007.– 50, N 2.– С. 129–134.
15. Максимов В. Г., Сухарьков О. В., Сухарьков А. О. Очистка деталей автомобилей с использованием гидродинамических излучателей // Тр. Одес. политех. ун-та.– 2002.– 1(17).– С. 65–68.