

УДК 66.063.61

## ОПТИМИЗАЦИЯ УЛЬТРАЗВУКОВОГО ЭМУЛЬГИРОВАНИЯ ПРИ МЕХАНИЧЕСКОМ ПЕРЕМЕШИВАНИИ

**Афанасенко Виталий Геннадьевич<sup>1</sup>,**  
afanasenko.v.g@yandex.ru

**Кулаков Петр Алексеевич<sup>1</sup>,**  
petr20071@mail.ru

**Боев Евгений Владимирович<sup>1</sup>,**  
boev\_ugntu@fromru.com

**Имаева Эмма Шаукатовна<sup>1</sup>,**  
imaeva2014@yandex.ru

**Давлетов Олег Борисович<sup>1</sup>,**  
davolegus@mail.ru

**Мазидуллин Денис Нарисович<sup>1</sup>,**  
azidullindenis@mail.ru

<sup>1</sup> Уфимский государственный нефтяной технический университет,  
Россия, 450062, г. Уфа, ул. Космонавтов, 1.

**Актуальность исследования.** Процесс эмульгирования широко распространён в промышленности как при первичной обработке углеводородов, так на конечных стадиях получения товарных продуктов. Особый интерес вызывает организация процесса непрерывного получения стабильных эмульсий в аппаратах проточного типа перед непосредственным их применением. Такой подход существенно снижает величину отклонения концентрации смеси от заданных значений, вызванную отстаиванием. Также переход от аппаратов периодического действия к аппаратам непрерывного действия позволяет сократить габариты и металлоёмкость оборудования при крупнотоннажном производстве, что в свою очередь облегчает транспортировку, снижает затраты на монтаж и ремонт. Одним из наиболее прогрессивных методов повышения эффективности эмульгирования является проведение процесса в условиях воздействия механических колебаний ультразвукового диапазона частот.

**Цель:** установить влияние параметров неоднородной системы на интенсивность эмульгирования при комплексном воздействии механического перемешивания и ультразвуковых колебаний.

**Методы:** аналитический обзор результатов исследований ультразвукового эмульгирования неоднородных систем, аналитическое исследование распространения колебаний ультразвукового диапазона через слой двухфазной эмульсии, экспериментальное исследование процесса эмульгирования несмешивающихся жидкостей при механическом перемешивании в поле действия ультразвуковых колебаний.

**Результаты.** Рассмотрен процесс эмульгирования в условиях механического перемешивания и воздействия волн ультразвукового диапазона. Аналитическим путем определена зависимость интенсивности эмульгирования от физико-химических свойств жидкостей, состава смеси и высоты слоя эмульсии. Выявлено, что появление зон с резонансными механическими колебаниями для наибольшей эффективности диспергирования наблюдается при условии, что расстояние между источником ультразвука и свободной поверхностью жидкости равно целому числу длин популовн механических колебаний в эмульсии. Полученные зависимости проверены экспериментальным путем при эмульгировании смеси «дизельное топливо – вода». Оценка качества эмульсии проводилась визуально по наличию сплошных однородных зон в объеме рассматриваемой системы, а также по размеру частиц дисперсной фазы, на фотографиях, полученных с помощью микроскопа.

### **Ключевые слова:**

Эмульсия, ультразвук, механические колебания, диспергирование, граница раздела фаз, механическое перемешивание.

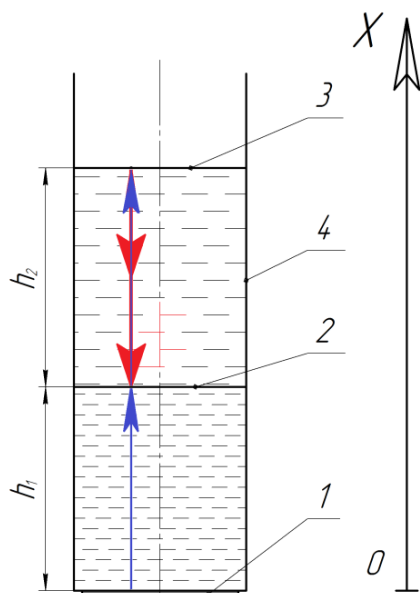
### **Ультразвуковое эмульгирование двухкомпонентных систем**

Процессы эмульгирования и деэмульгирования – одни из важнейших процессов на предприятиях нефтяной и нефтехимической промышленности, они проводятся на самых различных стадиях переработки нефтепродуктов: от обработки сырой нефти до получения готовой товарной продукции. Изучение механизма образования эмульсий в условиях различных воздействий является актуальной задачей, решение которой позволит повысить эффективность аппаратов для проведения указанных процессов и снизить их габаритные размеры [1–4].

Одним из перспективных направлений повышения эффективности процесса получения мелкодисперсных эмульсий является использование механических колебаний ультразвукового диапазона. При таком воздействии сплошность жидкой фазы нарушается, проявляется акустическая кавитация, которая еще больше повышает эффективность дробления дисперсной фазы и, соответственно, интенсивность эмульгирования [5–9].

В трудах [10–16] рассмотрен процесс эмульгирования на горизонтальной границе, образованной двумя несмешиваемыми жидкостями разной плотности.

Продольные ультразвуковые колебания вводятся в систему с помощью пластины, закрепленной в нижней части сосуда (рис. 1).



**Рис. 1.** Схема рассматриваемой модели: 1 – источник ультразвуковых колебаний; 2 – граница раздела фаз; 3 – свободная поверхность жидкости; 4 – корпус сосуда

**Fig. 1.** Scheme of the considered model: 1 – source of ultrasonic vibrations; 2 – interface; 3 – free surface; 4 – vessel body

В подобных системах жидкая фаза будет находиться под воздействием двух волн:

- прямой, создаваемой источником УЗК;
- обратной, отраженной от свободной поверхности эмульсии.

Суммарная амплитуда двух волн, накладываемых на границе раздела фаз, определяется:

$$A_{\text{н1}} = 2y_0 \cdot \cos 2\pi \frac{h_2}{\lambda_2} \cdot \cos 2\pi \left( \frac{h_1}{\lambda_1} + \frac{h_2}{\lambda_2} \right),$$

где  $y_0$  – максимальная амплитуда ультразвуковых колебаний, м;  $h_1, h_2$  – высота слоя первой и второй жидкости, м;  $\lambda_1, \lambda_2$  – длина волны ультразвуковых колебаний в первой и второй жидкости, м.

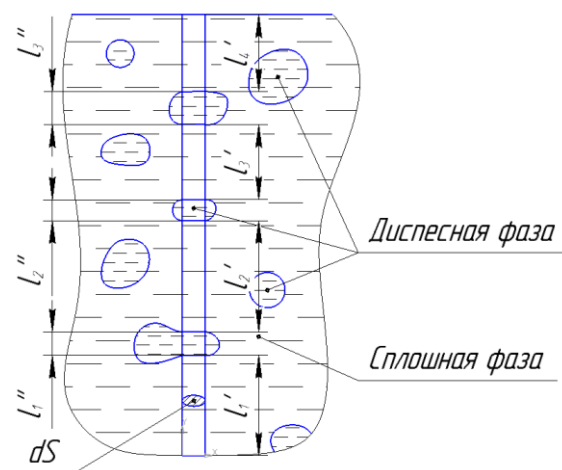
Использование данной формулы позволяет оценить интенсивность дискретного воздействия на статичную горизонтальную границу раздела фаз системы из двух несмешивающихся жидкостей с известными исходными параметрами.

Практическое применение полученных зависимостей в аппаратах непрерывного действия не представляется возможным, поскольку при движении сред из-за турбулентных явлений граница раздела фаз является неустойчивой по форме, положению и размерам, и даже небольшое возмущение движущихся потоков способно вызвать появление дисперсных частиц одной фазы в другой. Таким образом, граница раздела фаз будет непрерывно меняться и отклоняться от расчетного оптимального положения.

Исходя из вышесказанного, больший практический интерес представляет прогнозирование появления зон интенсивных механических колебаний в объеме, заполненном эмульсией с заданным составом, чем определение зависимости интенсивности эмульгирования при прохождении ультразвуковой волны через слои несмешивающихся жидкостей. Это связано с тем, что при грубом перемешивании дисперсная фаза, ограниченная межфазной поверхностью, при непрерывном изменении положения рано или поздно попадает в зону интенсивного воздействия и под действием ультразвука дробится на более мелкие частицы. То есть залогом эффективного эмульгирования является наличие большого количества зон интенсивных резонансных колебаний, поэтому основной задачей исследования является определение исходных параметров системы, при которых образуется максимальное число зон резонансных колебаний.

#### Аналитическое исследование распространения ультразвуковых колебаний в эмульсии

Для аналитического исследования распространения ультразвуковой волны в объеме, заполненном эмульсией, выделим элемент площадью  $dS$ , ориентированный в направлении распространения колебаний и ограниченный с одного торца поверхностью, излучающей ультразвук, а с другого – свободной поверхностью жидкости. Данный объем заполнен эмульсией, но так как поперечное сечение рассматриваемого элемента бесконечно мало, можно считать, что границы раздела фаз представляют собой плоскости, перпендикулярные направлению движения ультразвуковой волны (рис. 2).



**Рис. 2.** Элемент объема рассматриваемой системы двух несмешивающихся жидкостей

**Fig. 2.** Element of volume of the considered system of two immiscible liquids

При равномерном распределении дисперсной фазы в сплошной отношение суммарной длины элементов, заполненных одной жидкостью ( $\sum_{i=1}^n l_i', \text{м}$ ), к суммарной длине элементов, заполненных другой жидкостью ( $\sum_{j=1}^k l_j'', \text{м}$ ), будет численно равно объемной концентрации эмульсии.

Продольные механические колебания ультразвукового диапазона в рассматриваемом элементе будут беспрепятственно проходить из одной среды в другую, меняя при этом скорость распространения и длину волны. Средняя скорость движения колебаний для двухфазной эмульсии определяется по формуле:

$$C_{\text{эм}} = C_{\text{спл}}(1 - y) + C_{\text{дис}}y, \quad (1)$$

где  $C_{\text{спл}}$  – скорость ультразвуковых волн в сплошной среде, м/с;  $C_{\text{дис}}$  – скорость ультразвуковых волн в дисперсной фазе, м/с;  $y$  – объемная концентрация дисперсной фазы в смеси.

Рассмотрим наложение двух встречных волн в однородной среде. Амплитуда колебания прямой волны в произвольной точке с координатой  $x$ :

$$A = y_0 \cos 2\pi \frac{x}{\lambda_{\text{эм}}},$$

где  $y_0$  – максимальная амплитуда ультразвуковых колебаний, м;  $x$  – координата рассматриваемой точки, м;  $\lambda_{\text{эм}}$  – длина волны ультразвуковых колебаний в эмульсии, м.

Обратная волна в той же точке имеет амплитуду:

$$A = y_0 \cos 2\pi \frac{2h - x}{\lambda_{\text{эм}}},$$

где  $h$  – высота слоя эмульсии, м.

Амплитуда механических ультразвуковых колебаний суммарной волны при интерференции:

$$A_{\text{sum}}(x) = 2y_0 \cdot \cos 2\pi \frac{h}{\lambda_{\text{эм}}} \cdot \cos 2\pi \frac{h - x}{\lambda_{\text{эм}}}.$$

Анализируя полученное выражение, необходимо отметить, что появление зон с наиболее интенсивными механическими колебаниями наблюдается, когда расстояние до свободной поверхности ( $h$ ) равно целому числу полутолн ультразвуковых колебаний:

$$h = \frac{n \cdot \lambda_{\text{эм}}}{2},$$

где  $n$  – натуральное число;  $\lambda_{\text{эм}}$  – длина волны ультразвуковых колебаний в эмульсии, м.

Или с учетом выражения (1):

$$h = \frac{n(C_{\text{спл}}(1 - y) + C_{\text{дис}}y)}{2v}.$$

#### Экспериментальные исследования процесса эмульгирования при механическом перемешивании и воздействии ультразвука

Проверка указанных формул была проведена на примере эмульсии «вода – дизельное топливо», находящейся под воздействием ультразвуковых колебаний с частотой 30 кГц, кроме того, во время эксперимента производилось непрерывное механическое перемешивание. Такая комбинация факторов наиболее приближена к реальным условиям, в которых роль механической мешалки может выполнять турбулентный режим течения исходных жидкостей, обеспечивающий их грубое смешение, а мелкодисперсное

эмульгирование осуществляется при одновременном воздействии ультразвуковых колебаний [17–20].

В связи с ограниченными размерами испытательного сосуда, а также для предотвращения расслоения при предварительном перемешивании максимальная высота столба эмульсии принята 75 мм. Начальная концентрация воды 15 %, дизельной фракции 85 %, т. е. максимальная концентрация воды в эмульсии, при которой она может использоваться в качестве топлива для двигателей внутреннего сгорания.

Перед каждым экспериментом в емкость заливали заданное количество исходных компонентов. В связи с тем, что площадь поперечного сечения сосуда для приготовления эмульсии постоянная по высоте, объемная концентрация смеси задавалась отношением высот каждого слоя (15 и 85 % от общей высоты слоя эмульсии). Для создания грубой эмульсии использовалась механическая мешалка с частотой вращения до 500 об/мин, что позволило, с одной стороны, предотвратить расслоение неоднородной системы в начальный период времени, а с другой – не вызвать образование мелкодисперсной эмульсии (с частицами до 10 мкм) за счет турбулентных явлений и точнее оценить интенсивность воздействия ультразвука.

Наибольшее воздействие ультразвуковых колебаний на эмульсию наблюдается при расчетной высоте смеси 23, 46 и 69 мм, а минимальное – при толщине слоя 35 и 59 мм. На рис. 3 показаны результаты расслоения обработанной смеси с толщинами слоя 46 и 59 мм через 3 минуты.

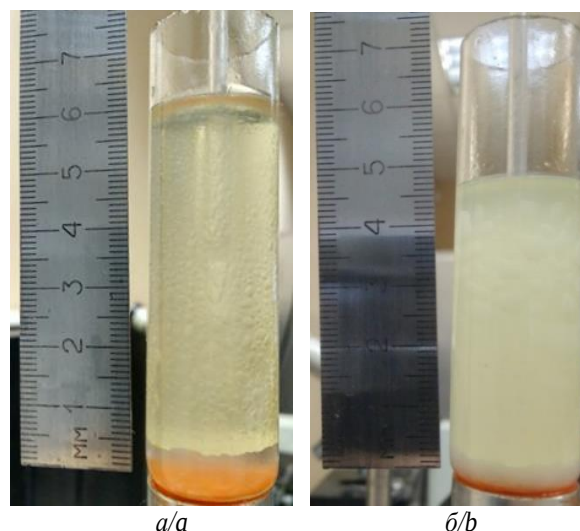


Рис. 3. Эмульсия «дизельное топливо – вода» после ультразвукового воздействия: а)  $h=59$  мм; б)  $h=46$  мм

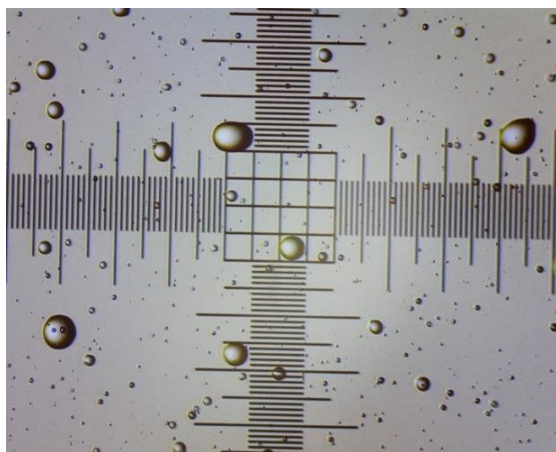
Fig. 3. Emulsion «diesel fuel – water» after ultrasonic treatment: а)  $h=59$  mm; б)  $h=46$  mm

При высоте слоя эмульсии 59 мм, то есть при расчетном минимальном воздействии ультразвука, отсутствовали акустические каверны при проведении процесса, а по окончании перемешивания сохранялась прозрачность смеси, что свидетельствует о малом количестве мелкодисперсной фазы в сплошной. Исследование эмульсии под микроскопом подтвердило данное

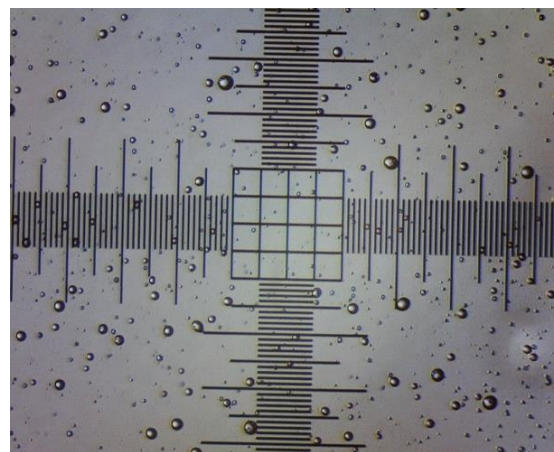
предположение (рис. 4, а) – в смеси присутствуют крупные образования, равномерность низкая.

Расчетная оптимальная высота смеси (46 мм) позволила существенно повысить степень воздействия ультразвука на обрабатываемую систему. В процессе смешения наблюдался характерный потрескивающий звук и образование зон интенсивного эмульгирования.

После окончания воздействия в дизельном топливе появлялись мелкодисперсные частицы воды, существенно уменьшающие прозрачность смеси. На рис. 4, б представлена смесь под микроскопом. Дисперсия распределения размеров капель ниже, что свидетельствует о более эффективном процессе эмульгирования.



а/а



б/б

**Рис. 4.** Размеры частиц воды в дизельном топливе. Расчетное воздействие ультразвука: а) минимальное; б) максимальное (цена минимального деления 10 мкм)

**Fig. 4.** Dimensions of water particles in diesel fuel. Estimated impact of ultrasound: a) minimum; b) maximum (value of the minimum division is 10 microns)

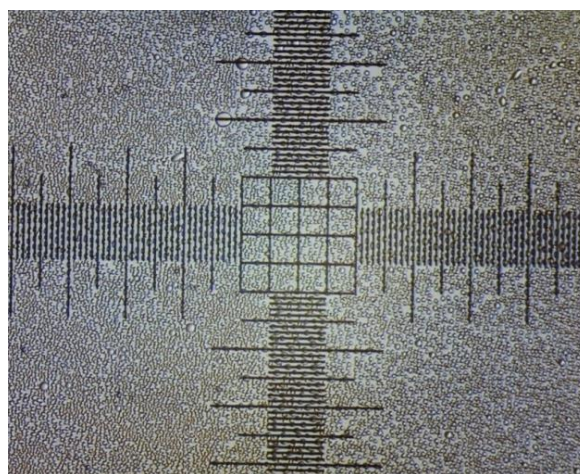
**Таблица.** Количественная оценка качества эмульсии

**Table.** Quantitative assessment of emulsion quality

| Диаметр частиц дисперсной фазы, мкм<br>Particle diameter of the dispersed phase, $\mu\text{m}$ | Эмульсия при минимальном расчетном воздействии ультразвука<br>Emulsion with a minimum influence by ultrasound |                                                     | Эмульсия при максимальном расчетном воздействии ультразвука<br>Emulsion with a maximum influence by ultrasound |                                                     |
|------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------|
|                                                                                                | Количество, шт<br>Quantity, pcs                                                                               | Объемная концентрация, %<br>Volume concentration, % | Количество, шт<br>Quantity, pcs                                                                                | Объемная концентрация, %<br>Volume concentration, % |
| 0–5                                                                                            | 268                                                                                                           | 4,23                                                | 450                                                                                                            | 10,15                                               |
| 5–10                                                                                           | 96                                                                                                            | 12,61                                               | 175                                                                                                            | 32,88                                               |
| 10–15                                                                                          | 64                                                                                                            | 34,43                                               | 40                                                                                                             | 30,78                                               |
| 15–20                                                                                          | 6                                                                                                             | 10,01                                               | 7                                                                                                              | 16,71                                               |
| 20–50                                                                                          | 9                                                                                                             | 38,73                                               | 2                                                                                                              | 9,48                                                |
| Итого/Total                                                                                    | 443                                                                                                           | 100                                                 | 674                                                                                                            | 100                                                 |

Анализ распределения частиц по размерам представлен в таблице. Необходимо отметить, что при аналогичных исходных параметрах смеси оптимальные параметры системы позволяют увеличить количество образующихся частиц дисперсной фазы в 1,5 раза. При максимальном расчетном воздействии ультразвука более 60 % объема дисперсной фазы дробятся на частицы диаметром 5–15 мкм, при этом отсутствуют глобулы диаметром более 25 мкм. При обработке смеси ультразвуком в условиях минимального расчетного воздействия менее половины объема вводимого компонента смеси достигает целевого размера частиц, при этом в полученной эмульсии присутствуют частицы дисперсной фазы более 25 мкм.

При максимальном воздействии ультразвука на смесь образуется квазистабильная эмульсия в нижней части сосуда, сплошной фазой которой является вода. Прозрачность смеси низкая, возможность оптического исследования была только для тонких слоев полученной смеси. На рис. 5 представлена фотография с микроскопа пробы, отобранной из нижней части сосуда.



**Рис. 5.** Размеры частиц дизельного топлива в воде (цена минимального деления 10 мкм)

**Fig. 5.** Dimensions of diesel fuel particles in water (value of the minimum division of 10 microns)

Стабильность смеси в состоянии покоя сохранялась на протяжении 12 дней, после этого в нижней части визуально отмечалось появление прозрачного слоя. Это свидетельствует об эффективном эмульгировании при одновременном воздействии ультразвуковых колебаний и механического перемешивания в условиях оптимального состояния исходной системы.

#### Заключение

Таким образом, аналитическая зависимость вероятности появления зон с интенсивными колебаниями от физико-химических свойств и состояния двухкомпонентной смеси позволит оптимизировать устройства для эмульгирования неоднородных систем при комплексном воздействии механического и ультразвукового воздействия. Практическое применение

полученных зависимостей реализуется в процессе разработки и оптимизации устройств для эмульгирования проточного типа, в которых грубое механическое перемешивание происходит за счет турбулентных явлений при движении исходной смеси, а ультразвуковые колебания перпендикулярно скорости движению потока вводятся с помощью пьезоэлектрических преобразователей.

*Исследования проведены в Уфимском государственном нефтяном техническом университете в рамках реализации инициативного научного проекта фундаментального характера по государственному заданию образовательным учреждениям высшего образования на 2017–2019 гг. (№ 9.7294.2017/8.9 от 31.01.2017) при содействии Межвузовского центра коллективного пользования «Региональный научно-производственный комплекс "Недра"».*

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Effect of emulsification and blending on the oxygenation and substitution of diesel fuel for compression ignition engine / Ftwi Y. Hagos, Obed M. Ali, Rizalman Mamat, Abdul A. Abdullah // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. – August 2017. – V. 75. – P. 1281–1294.
2. Иванов В.П., Дронченко В.А. Разрушение поверхности раздела двух несмешивающихся жидкостей при эмульгировании // *Вестник Брестского государственного технического университета*. – 2014. – № 4 (88). – С. 38–42.
3. Эмульгирование водонефтяных смесей в рабочих органах винтовых насосов / А.М. Бадретдинов, Ф.А. Мамонов, А.М. Валеев, Р.Я. Загиров, Р.З. Ахметгалеев // *Проблемы сбора, подготовки и транспорта нефти и нефтепродуктов*. – 2005. – № 64. – С. 231–234.
4. Оценка эффективности работы прямоточных смесителей для перемешивания гомо- и гетерогенных систем / Ф.Ш. Хафизов, В.Г. Афанасенко, И.Ф. Хафизов, А.Ш. Хайбрахманов // *Химическая промышленность*. – 2008. – Т. 85. – № 3. – С. 152–155.
5. Silver B.R., Holub K., Mareček V. Spontaneous emulsification at surfactantless liquid/liquid interfaces // *Journal of Electroanalytical Chemistry*. – 2017. – V. 805. – № 15. – P. 91–97.
6. Кудряшов Б.А., Ливанский А.Н., Нигметзянов Р.И. Перспективы использования ультразвукового эмульгирования в промышленности // *Наукоемкие технологии в машиностроении*. – 2011. – № 6. – С. 25–28.
7. Hamida T., Babadagli T. Investigations on capillary and viscous displacement under ultrasonic waves // *Journal of Canadian Petroleum Technology*. – 2006. – V. 45. – № 2. – С. 16–19.
8. Homogenisation devices for the production of miniemulsions / K. Ouzineb, C. Lord, N. Lesauze, C. Graillat, P.A. Tanguy, T. McKenna // *Chemical Engineering Science*. – 2006. – V. 61. – № 9. – P. 2994–3000.
9. Кудряшова О.Б., Антонникова А.А. Математическая модель эволюции аэрозолей при ультразвуковом воздействии // *Известия Томского политехнического университета*. – 2013. – Т. 322. – № 2. – С. 160–163.
10. Изменение фракционного состава углеводородного топлива в поле акустической кавитации / М.Г. Руденко, Т.А. Лавренко, М.И. Васильцов, С.С. Горбасенко // *Современные технологии и научно-технический прогресс*. – 2016. – № 1. – С. 23–24.
11. Интенсификация процесса эмульгирования в условиях одновременного воздействия прямых и отраженных ультразвуковых колебаний / В.Г. Афанасенко, И.Р. Кузеев, Ю.С. Ковшова, П.А. Кулаков // *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов*. – 2018. – Т. 329. – № 11. – С. 44–51.
12. Ультразвуковое эмульгирование нефти и нефтепродуктов / А.Н. Ливанский, Б.А. Кудряшов, В.Д. Титков, А.Ю. Дунин // *Автоматизация, телемеханизация и связь в нефтяной промышленности*. – 2011. – № 11. – С. 28–32.
13. Формирование зон с максимальной интенсивностью ультразвуковой кавитации в однокомпонентных и многокомпонентных средах / Б.И. Бахтин, А.И. Ивашов, А.В. Кузнецов, А.С. Скороходов // *Инженерно-физический журнал*. – 2016. – Т. 89. – № 3. – С. 662–669.
14. Behrend O., Schubert H. Influence of hydrostatic pressure and gas content on continuous ultrasound emulsification // *Ultrasonics Sonochemistry*. – 2001. – V. 8. – № 3. – P. 271–276.
15. Cuheval A., Chow R.C.Y. A study on the emulsification of oil by power ultrasound // *Ultrasonics Sonochemistry*. – 2008. – V. 15. – № 5. – P. 916–920.
16. Banks C.E., Klymenko O.V., Compton R.G. Liquid-liquid processes and kinetics in acoustically emulsified media // *PCCP: Physical Chemistry Chemical Physics*. – 2003. – V. 5. – № 8. – P. 1652–1656.
17. Кулаков П.А., Афанасенко В.Г. Влияние минимально допустимого количества сырья на вероятность отказа системы насос-емкость // *Химическое и нефтегазовое машиностроение*. – 2018. – № 9. – С. 37–40.
18. Emulsification in novel ultrasonic cavitation intensifying bag reactors / R. van Zwieten, B. Verhaagen, K. Schroën, D.F. Rivas // *Ultrasonics Sonochemistry*. – May 2017. – V. 36. – P. 446–453.
19. Поверхность и поверхностные явления / И.Р. Кузеев, Е.А. Наумкин, Ю.Н. Савичева, С.В. Попова. – Уфа: Изд-во «Нефтегазовое дело», 2009. – 144 с.
20. Поверхность кавитирующего пузырька / В.Б. Акопян, С.В. Альков, М.В. Бамбура, Ю.А. Ершов // *Машиностроитель*. – 2015. – № 12. – С. 10–15.

Поступила 12.03.2020 г.

#### Информация об авторах

**Афанасенко В.Г.**, кандидат технических наук, заведующий кафедрой механики и конструирования машин Уфимского государственного нефтяного технического университета.

**Кулаков П.А.**, кандидат технических наук, доцент кафедры технологических машин и оборудования Уфимского государственного нефтяного технического университета.

**Боев Е.В.**, кандидат технических наук, заведующий кафедрой общей химической технологии Уфимского государственного нефтяного технического университета.

**Имаева Э.Ш.**, кандидат технических наук, доцент кафедры механики и конструирования машин Уфимского государственного нефтяного технического университета.

**Давлетов О.Б.**, старший преподаватель кафедры механики и конструирования машин Уфимского государственного нефтяного технического университета.

**Мазидуллин Д.Н.**, ассистент кафедры механики и конструирования машин Уфимского государственного нефтяного технического университета.

UDC 66.063.61

## OPTIMIZATION OF ULTRASOUND EMULSION UNDER MECHANICAL MIXING

**Vitaly G. Afanasenko<sup>1</sup>,**  
afanasenko.v.g@yandex.ru

**Petr A. Kulakov<sup>1</sup>,**  
kulakov.p.a@mail.ru

**Evgeniy V. Boev<sup>1</sup>,**  
boev\_ugntu@fromru.com

**Emma Sh. Imaeva<sup>1</sup>,**  
imaeva2014@yandex.ru

**Oleg B. Davletov<sup>1</sup>,**  
davolegus@mail.ru

**Denis N. Mazidullin<sup>1</sup>,**  
mazidullinden@mail.ru

<sup>1</sup> Ufa State Petroleum Technological University,  
1, Kosmonavtov street, Ufa, 450062, Russia.

**Relevance of the research.** The process of emulsification is widespread in industry both in the primary processing of hydrocarbons and in the final stages of production of marketable products. The organization of continuous production of stable emulsions in flow-type devices before their direct application is of particular interest. This approach significantly reduces the deviation of the mixture concentration from the given values, caused by settling. The transition from batch devices to continuous machines allows reducing as well the size and intensity of the equipment, with large-scale production, which in its turn facilitates transportation, reduces installation and repair costs. One of the most progressive methods of increasing the efficiency of emulsification is to conduct the process under the influence of mechanical vibrations of the ultrasonic frequency range.

**The main aim** of the research is to establish the influence of the inhomogeneous system parameters on the emulsification intensity under the complex effect of mechanical mixing and ultrasonic vibrations.

**Methods:** analytical review of the results of ultrasound emulsification of inhomogeneous systems, analytical study of the propagation of vibrations of the ultrasonic range through a layer of a two-component emulsion, experimental study of emulsification of immiscible liquids under mechanical stirring in the field of action of ultrasonic vibrations.

**Results.** The paper considers emulsification under conditions of mechanical mixing and exposure to ultrasonic waves. The authors have determined analytically the dependence of the emulsification intensity on the physicochemical properties of liquids, the composition of the mixture and the height of the emulsion layer. It is revealed that the appearance of zones with resonant mechanical vibrations for the greatest dispersion efficiency is observed provided that the distance between the ultrasound source and the free surface of the liquid is an integer number of half-wavelengths of mechanical vibrations in the emulsion. The dependences obtained were verified experimentally by emulsifying the «diesel fuel – water» mixture. Evaluation of the quality of the emulsion was carried out visually by the presence of continuous homogeneous zones in the volume of the system under consideration, as well as by the size of the particles of the dispersed phase, in photographs taken with a microscope.

### Key words:

Emulsion, ultrasonics, mechanical vibrations, dispersion, interphase boundary, mechanical mixing.

The research was carried out at Ufa State Petroleum Technological University within the implementation of initiative scientific project of fundamental nature by the State task for higher education institutions for 2017–2019 (no. 9.7294.2017/8.9, 31.01.2017) with assistance of the Interuniversity core facilities centre «Regional research and production complex "Nedra"».

### REFERENCES

1. Ftwi Y. Hagos, Obed M. Ali, Rizalman Mamat, Abdul A. Abdul-lah Effect of emulsification and blending on the oxygenation and substitution of diesel fuel for compression ignition engine. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, August 2017, vol. 75, pp. 1281–1294.
2. Ivanov V. P., Donchenko V.A. The destruction of the interface of two immiscible liquids in emulsified. *Vestnik of Brest state technical University*, 2014, no. 4 (88), pp. 38–42. In Rus.
3. Badretdinov A.M. Mamonov F.A., Valeev A.M., Zagirov R.Ya., Ahmetgaliev R.Z. Emulsification of oil-water mixtures in the working bodies of screw pumps. *Problems of gathering, treatment and transportation of oil and petroleum products*, 2005, no. 64, pp. 231–234. In Rus.
4. Khafizov F.Sh., Afanasenko V.G., Khafizov I.F., Khaibrakhmanov A.Sh. Main treatment ways of manufacturing water on the local plants. *Russian Journal of Applied Chemistry*, 2008, vol. 81, no. 9, pp. 1697–1698.
5. Silver B.R., Holub K., Mareček V. Spontaneous emulsification at surfactantless liquid/liquid interfaces. *Journal of Electroanalytical Chemistry*, 2017, vol. 805, no. 15, pp. 91–97.
6. Kudryashov B.A., Lebanese A.N., Nigmatzyanov R.I. Prospects for the use of ultrasonic emulsification in industry. *High technologies in mechanical engineering*, 2011, no. 6, pp. 25–28. In Rus.
7. Hamida T., Babadagli T. Investigations on capillary and viscous displacement under ultrasonic waves. *Journal of Canadian Petroleum Technology*, 2006, vol. 45, no. 2, pp. 16–19.

8. Ouzineb K., Lord C., Lesauze N., Graillat C., Tanguy P.A., McKenna T. Homogenisation devices for the production of miniemulsions. *Chemical Engineering Science*, 2006, vol. 61, no. 9, pp. 2994–3000.
9. Kudryashova O.B., Antonicheva A.A. Mathematical model of the evolution of aerosols at ultrasonic influence. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 2013, vol. 322, no. 2, pp. 160–163.
10. Rudenko M.G., Lavrenyuk T.A., Vasilov M.I., Gorbatenko S.S. Changing of the fractional composition of hydrocarbon fuels in the field of acoustic cavitation. *Modern technologies and scientific-technical progress*, 2016, no. 1, pp. 23–24. In Rus.
11. Afanasenko V.G., Kuzev I.R., Koushova Yu.S., Kulakov P.A. Emulsification intensification under simultaneous impact of original and reflected ultrasonic vibrations. *Bulletin of the Tomsk polytechnic university. Geo assets engineering*, 2018, vol. 329, no. 11, pp. 44–51.
12. Lebanese A.N., Kudryashov B.A., Titkov V.D., Dunin A.Y. Ultrasonic emulsification of oil and oil products. *Automation, telemechanization and communication in oil industry*, 2011, no. 11, pp. 28–32. In Rus.
13. Bakhtin B.I., Ivashov A.I., Kuznetsov A.V., Skorokhodov A.S. Formation of zones of maximum intensity of ultrasonic cavitation in single-component and multicomponent environments. *Engineering-physical journal*, 2016, vol. 89, no. 3, pp. 662–669. In Rus.
14. Behrend O., Schubert H. Influence of hydrostatic pressure and gas content on continuous ultrasound emulsification. *Ultrasonics Sonochemistry*, 2001, vol. 8, no. 3, pp. 271–276.
15. Cuheval A., Chow R.C.Y. A study on the emulsification of oil by power ultrasound. *Ultrasonics Sonochemistry*, 2008, vol. 15, no. 5, pp. 916–920.
16. Banks C.E., Klymenko O.V., Compton R.G. Liquid–Liquid processes and kinetics in acoustically emulsified media. *PCCP: Physical Chemistry Chemical Physics*, 2003, vol. 5, no. 8, pp. 1652–1656.
17. Kulakov P.A., Afanasenko V.G. Influence of minimally permissible quantity of source materials on the probability of failure of a pump-tank system. *Chemical and petroleum engineering*, 2019, vol. 54, no. 9–10, pp. 681–686.
18. van Zwieten R., Verhaagen B., Schroën K., Rivas D.F. Emulsification in novel ultrasonic cavitation intensifying bag reactors. *Ultrasonics Sonochemistry*, May 2017, vol. 36, pp. 446–453.
19. Kuzev I.R., Naumkin E.A., Savicheva Yu.N., Popov S.V. *Poverkhnost i poverkhnostnye yavleniya* [Surface and surface phenomena]. Ufa, Neftegazovoe delo Publ., 2009. 144 p.
20. Akopyan V.B., Alkov S.V., Bambur M.V., Ershov Yu.A. The surface of cavitation bubble. *Mashinostroitel*, 2015, no. 12, pp. 10–15. In Rus.

Received: 12 March 2020.

#### Information about the authors

**Vitaly G. Afanasenko**, Cand. Sc., associate professor, Ufa State Petroleum Technological University.

**Petr A. Kulakov**, Cand. Sc., associate professor, Ufa State Petroleum Technological University.

**Evgeniy V. Boev**, Cand. Sc., associate professor, Ufa State Petroleum Technological University.

**Emma Sh. Imaeva**, Cand. Sc., associate professor, Ufa State Petroleum Technological University.

**Oleg B. Davletov**, senior lecturer, Ufa State Petroleum Technological University.

**Denis N. Mazidullin**, assistant, Ufa State Petroleum Technological University.