

УДК 66.063.61

## ИНТЕНСИФИКАЦИЯ ПРОЦЕССА ЭМУЛЬГИРОВАНИЯ В УСЛОВИЯХ ОДНОВРЕМЕННОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ ПРЯМЫХ И ОТРАЖЕННЫХ УЛЬТРАЗВУКОВЫХ КОЛЕБАНИЙ

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

Кузеев Искандер Рустемович<sup>1</sup>,  
kuzeev2002@mail.ru

Ковшова Юлия Сергеевна<sup>1</sup>,  
july52008@yandex.ru

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

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

**Актуальность исследования.** Процессы создания и разрушения устойчивой смеси нерастворимых жидкостей широко применяются на всех стадиях жизненного цикла товарных углеводородов: от первичной промышленной обработки до глубокой переработки нефтепродуктов. Интенсификация как прямого, так и обратного процесса позволит существенно сократить габариты и металлоемкость необходимого технологического оборудования, что в свою очередь облегчит транспортировку, снизит 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 исследования:** установить влияние параметров неоднородной системы на интенсивность эмульгирования в поле действия ультразвуковых колебаний.

**Методы:** общие принципы распространения, отражения и интерференции акустических колебаний в жидких средах, экспериментальные методы исследования акустического эмульгирования несмешивающихся жидкостей.

**Результаты.** Рассмотрен механизм создания эмульсии в условиях интерференции двух встречных волн ультразвукового диапазона на границу контакта исходных жидкостей. Установлено, что наибольшая эффективность диспергирования наблюдается при резонансном воздействии. Аналитическим путем определена зависимость интенсивности воздействия механических колебаний на произвольную точку системы, образованной двумя несмешивающимися жидкостями, при распространении ультразвука в нормальном по отношению к границе раздела фаз направлении. Сопоставление результатов аналитических и экспериментальных исследований показало, что расхождение полученных данных составляет менее 10 %, что позволяет, с достаточной степенью точности, применять описанную методику расчета для оптимизации конструкций устройств для эмульгирования неоднородных смесей.

### Ключевые слова:

Эмульсия, ультразвук, механические колебания, диспергирование, граница раздела фаз, резонанс.

### Введение

Эмульсия – это неоднородная смесь нерастворимых друг в друге жидкостей. При этом одна из жидкостей будет являться сплошной (дисперсионной) фазой, а вторая дискретной (дисперсной). Эмульгирование – сложный процесс, он невозможен без ввода дополнительной энергии. Это объясняется тем, что в спокойном состоянии контакт двух чистых жидкостей с разной плотностью будет осуществляться по горизонтальной границе раздела фаз, которая обладает постоянной поверхностной энергией, зависящей от ее размеров и физико-химических свойств компонентов. Диспергирование одной из жидкостей в другой приводит к увеличению площади контакта фаз и, соответственно, суммарной поверхностной энергии, необходимой для образования поверхности.

Для эмульгирования жидкостей применяют различные устройства, которые воздействуют на обрабатываемую систему вибрацией, ультразвуком, большими градиентами скоростей сдвига

(в так называемых коллоидных мельницах), соударением струй двух жидкостей, вытекающих из узких отверстий и тому подобное. Рассмотрим более подробно процесс эмульгирования под действием акустических колебаний, называемого ультразвуковым диспергированием в жидкости.

Ультразвуковое диспергирование (эмульгирование) позволяет получать высокодисперсные, практически однородные и химически чистые эмульсии. Для интенсивного протекания процесса необходима кавитация, условия возникновения и протекания которой определяют основные зависимости эмульгирования от интенсивности и частоты ультразвука, температуры, давления, наличия растворенных газов и т. п. [1–8].

Детальный механизм образования капель эмульсии под действием кавитации до сих пор не известен, существуют лишь гипотезы.

В соответствии с одной из них кавитационная полость образуется в месте расположения неоднородности – на границе раздела фаз, и в стадии зах-

лопывания увлекает и отрывает капельки от общей массы другой жидкости.

Другая гипотеза объясняет образование эмульсии распадом на капельки кумулятивных струй, образовавшихся при несимметричном захлопывании кавитационных полостей. Как отмечают авторы [1, 2, 9–13], эмульгирование начинается, когда интенсивность ультразвука превышает некоторое значение, ниже которого процесс не протекает. Величина пороговой интенсивности снижается, если эмульгирование протекает вблизи поверхности твердой фазы, инициирующей образование кавитации.

Во всех случаях с увеличением времени воздействия ультразвуковых колебаний концентрация эмульсии возрастает, достигая некоторого предельного значения. Существование предельной концентрации обусловлено одновременным протеканием процесса противоположного направления – акустической коагуляции – и изменением в ходе процесса условий для возникновения кавитации.

В замкнутом сосуде распространение ультразвуковых колебаний имеет свои особенности, которые необходимо учитывать при проведении процесса эмульгирования. Например, как и всем видам волн, ультразвуковым присущи явления отражения и преломления. Так волна, попадая на границу раздела сред, в общем случае делится на две волны: первая проходит через границу и распространяется во второй среде, а вторая отражается и остается в первой. Величина энергий прошедшей и отраженной от границы раздела волн зависит от акустического сопротивления сред ее образующих [13–18].

Другим явлением, которое необходимо учитывать при использовании ультразвуковых колебаний для интенсификации технологических процессов, является интерференция. Это явление наложения двух волн, в зависимости от фаз которых, приводящее к локальному увеличению или уменьшению амплитуды колебаний результирующей волны.

Особенно данные явления проявляются при низкой интенсивности воздействия ультразвуковых колебаний на жидкую фазу, при которой энергии одной волны не хватает для разрыва сплошной фазы. В этом случае наложение нескольких ультразвуковых волн приводит к появлению зон с повышенной интенсивностью воздействия, достаточной для появления акустической кавитации.

#### Объект исследования и его аналитическое описание

Рассмотрим эмульсию, образованную двумя несмешиваемыми жидкостями разной плотности. Указанная эмульсия при заполнении сосуда образует два слоя с горизонтальной границей раздела фаз. Генерация продольных ультразвуковых колебаний в системе осуществляется с помощью пластины, закрепленной в нижней части сосуда (рис. 1).

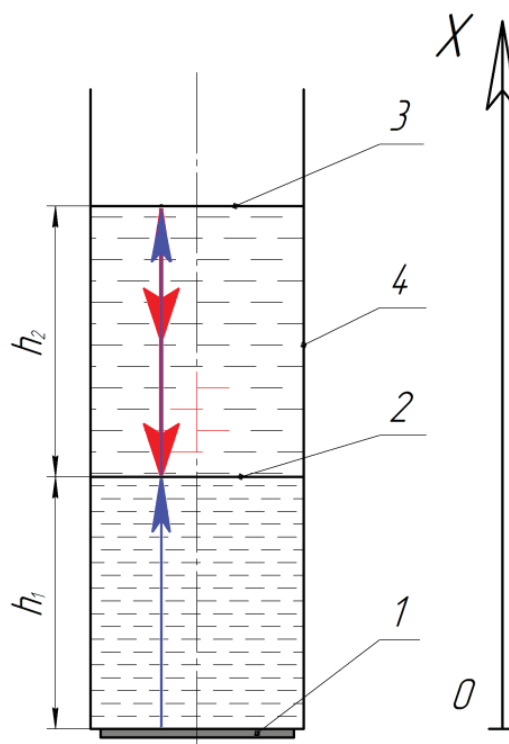


Рис. 1. Схема экспериментальной установки: 1 – источник ультразвуковых колебаний; 2 – граница раздела фаз; 3 – свободная поверхность жидкости; 4 – корпус сосуда

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

Рассмотрим идеализированную модель, в которой распространение механических колебаний происходит только в направлении одной оси, перпендикулярной границе раздела фаз, причем начало координат находится на пластине, генерирующей колебания. Затуханием волны пренебрежем, что характерно для ультразвуковых колебаний частотой до 50 кГц, проходящих через слой однородной жидкости толщиной до 100 мм.

Продольная ультразвуковая волна заданной частоты от начала координат ( $x=0$ ) проходит через первую жидкую среду, далее она преодолевает границу раздела фаз ( $x=h_1$ , где  $h_1$  – толщина слоя более тяжелой жидкости), при этом меняется скорость ее распространения и длина волны. После этого рассматриваемая волна проходит вторую среду и, дойдя до внешней границы раздела «жидкость–газ» ( $x=h_1+h_2$ ), практически полностью возвращается назад. Величиной энергии, прошедшей в газовую фазу волны, можно пренебречь, т. к. акустическое сопротивление газа во много раз отличается от аналогичного показателя жидкостей. Таким образом, на границу контакта двух жидкостей ( $x=h_1$ ) одновременно воздействуют две акустические волны:

- прямая, создаваемая генератором УЗК;
- обратная, отраженная от свободной поверхности эмульсии.

Рассмотрим результат интерференции двух указанных синусоидальных плоских волн. Амплитуду колебаний волны в произвольной точке с координатой  $x$  определяем из следующего выражения:

$$A = y_0 \cos 2\pi \frac{x}{\lambda},$$

где  $y_0$  – максимальная амплитуда ультразвуковых колебаний, м;  $\lambda$  – длина волны, м.

Для определения условия резонанса необходимо знать величину амплитуды на границе раздела фаз:

$$A' = y_0 \cos 2\pi \frac{h_1}{\lambda_1}. \quad (1)$$

Амплитуда колебаний обратной волны, которая отразилась от свободной поверхности жидкости заполняющей сосуд:

$$A'' = y_0 \cos 2\pi \left( \frac{h_1}{\lambda_1} + \frac{2h_2}{\lambda_2} \right). \quad (2)$$

Суммарная амплитуда двух волн, накладываемых на границе раздела фаз, определяется из формул (1) и (2):

$$A_{h1} = 2y_0 \cos 2\pi \frac{h_2}{\lambda_2} \cos 2\pi \left( \frac{h_1}{\lambda_1} + \frac{h_2}{\lambda_2} \right). \quad (3)$$

Таким образом, если произведение

$$\cos 2\pi \frac{h_2}{\lambda_2} \cos 2\pi \left( \frac{h_1}{\lambda_1} + \frac{h_2}{\lambda_2} \right)$$

из формулы (3) приближается по модулю к 1,0, то на границе раздела фаз рассматриваемой эмульсии наблюдается явление резонанса, существенно интенсифицирующего эмульгирование в этой области. При этом в зависимости от толщины слоев эпицентр воздействия может быть смещен как в надграничную, так и подграничную зону, что будет проявляться в определении дисперсионный фазы в образующейся эмульсии.

#### Экспериментальные результаты исследования и их обсуждение

Чтобы доказать правомерность данных модельных представлений необходимо поставить эксперимент, в котором осуществить контролируемое изменение наложенных волн на границе раздела фаз.

На данный момент времени проведены эксперименты, которые подтверждают правомерность данных модельных представлений. Специальная стеклянная колба устанавливается на концентратор генератора ультразвуковых волн частотой 30 кГц, в колбу заливается дистиллированная вода. Необходимо отметить, что никаких видимых эффектов на данном этапе не наблюдается. Затем, набрав в шприц смесь жидких углеводородов, начинаем добавлять ее по одной капле в колбу с дистиллированной водой. Вначале никаких видимых изменений не происходит, но в определенный мо-

мент с поверхности раздела углеводород–вода наблюдается образование мелкодисперсной эмульсии в виде «тумана», которая как бы «выстреливается» ультразвуковыми волнами с поверхности раздела фаз и перемещается от границы раздела фаз. После образования определенной порции эмульсии процесс эмульгирования прекращается (рис. 2).

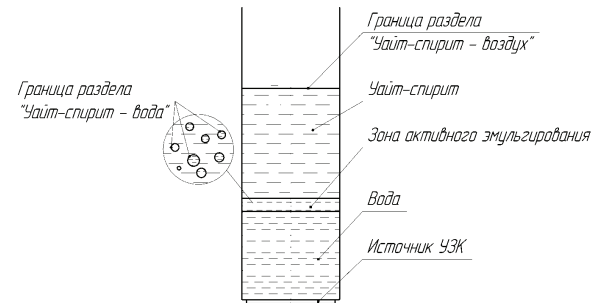


Рис. 2. Образование эмульсии на границе раздела «уайт-спирит–вода»

Fig. 2. Formation of emulsion at the interface of «white spirit–water»

В некоторых случаях процессу эмульгирования предшествует образование на свободной поверхности стоячих волн (в виде сложного узора), которые медленно вращаются поочередно в разные стороны. Отчетливо данное явление проявляется при использовании в качестве жидкого углеводорода уайт-спирита. В этом случае со следующей порцией углеводорода начинается процесс слабого эмульгирования с сохранением стоячих волн. При дальнейшем вливании уайт-спирита стоячие волны на поверхности исчезают, а процесс эмульгирования интенсифицируется. Если извлечь часть уайт-спирита, процесс эмульгирования прекращается. Необходимо отметить, что начало процесса всегда сопровождается звуком, типа потрескивания, когда процесс прекращается звук стихает [19, 20].

Это явление связано с изменением толщины слоев жидкостей, которое приводит к смене положения зон интенсивных ультразвуковых воздействий и удалению (или приближению) к месту непосредственного контакта фаз.

Как отмечалось в аналитическом исследовании, в объеме рассматриваемой системы происходит наложение двух встречных ультразвуковых волн (прямая от генератора и отраженная от свободной поверхности жидкости), которое за счет явления интерференции создает зоны пониженной и повышенной интенсивности колебаний. Причем, если зоны первого типа невозможно визуально увидеть в обрабатываемой системе, то зоны с высокой амплитудой механических колебаний детектируются за счет появления устойчивых пузырьков пара, являющихся следствием разрыва жидкой субстанции при акустической кавитации. Размер пузырьков зависит от суммарной амплитуды ультразвуковых колебаний в рассматриваемой точке.

Для определения амплитуды механических колебаний в произвольной точке второго слоя по аналогии с выводом формулы (3) получено выражение:

$$A_x = y_0 \cos 2\pi \left( \frac{h_1}{\lambda_1} + \frac{x - h_1}{\lambda_2} \right) + y_0 \cos 2\pi \left( \frac{h_1}{\lambda_1} + \frac{2h_2 + h_1 - x}{\lambda_2} \right). \quad (4)$$

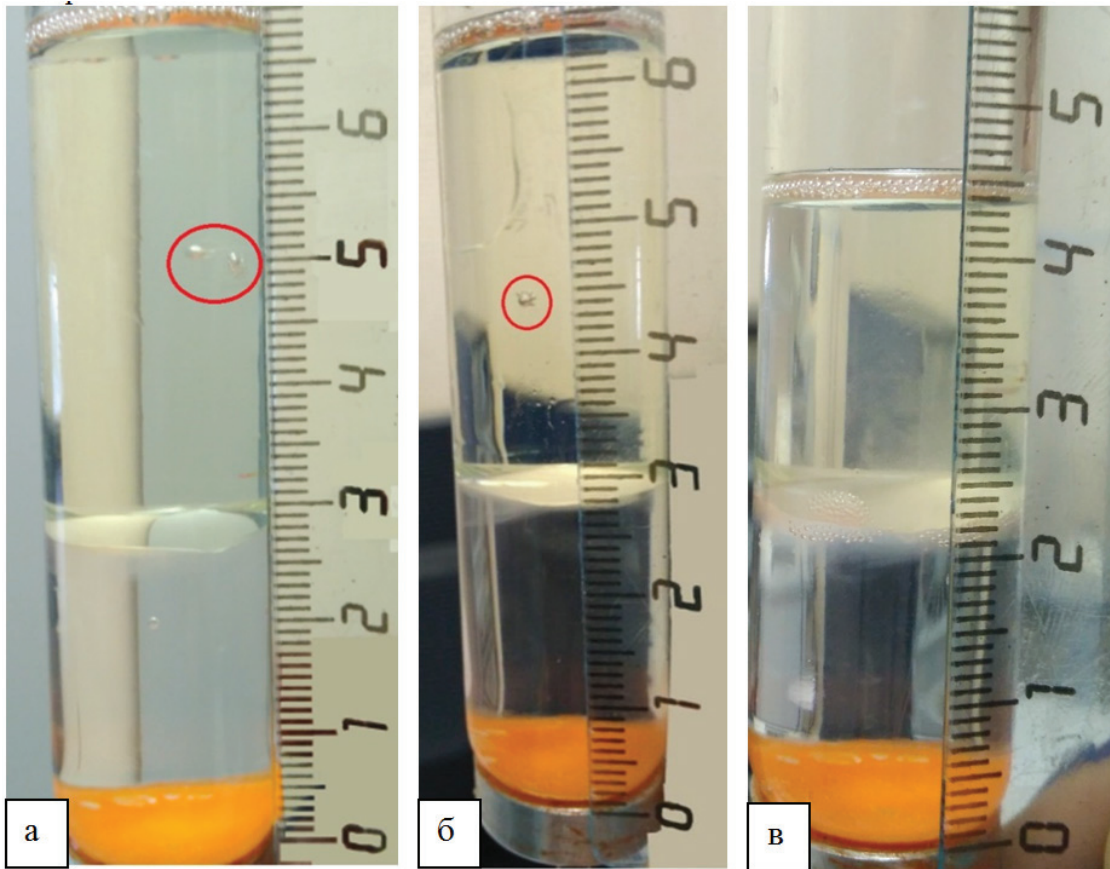
Полученная формула (4) используется для построения графика изменения суммарной амплитуды колебаний по высоте рассматриваемого сосуда, который необходим для прогнозирования мест появления зон интенсивной акустической кавитации.

На рис. 3, а, б показаны фотографии устойчивых кавитационных каверн, образующихся в эмульсии «дизельное топливо – вода» при различной толщине слоев. В первом случае образуются каверны диаметром от 1,5 до 2,0 мм, во втором из-за меньшей интенсивности воздействия около 1,0 мм. На рис. 3, в представлена фотография интенсивного эмульгирования при совпадении зоны максимальных механических колебаний с границей раздела фаз. Визуально наблюдается появление каверн размером до 0,5 мм и изменение прозрачности жидкости вблизи межфазной поверхности.

**Таблица.** Результаты экспериментальных и аналитических исследований процесса эмульгирования

**Table.** Results of experimental and analytical studies of emulsification

Толщина слоя воды, $h_1$ , мм Water layer thickness, $h_1$ , mm	Толщина слоя ДТ, $h_2$ , мм Diesel fuel layer thickness, $h_2$ , mm	Высота каверны, определенная экспериментальным путем, мм Height of the cavity determined experimentally, mm	Теоретическая высота зоны максимальных УЗК, мм Theoretical height of the zone of maximum ultrasound, mm
29	40	49	46,4
28	37	44	42,4
22	23	22	22,1
29	38	Каверна отсутствует Cavern is absent	зон с повышенной амплитудой нет zones with an increased amplitude of oscillations are absent
29	37	45	43,4
29	31	Каверна отсутствует Cavern is absent	зон с повышенной амплитудой нет zones with an increased amplitude of oscillations are absent
29	41	49	47,4



**Рис. 3.** Положение кавитационной каверны в системе «вода–ДТ» при различной толщине слоев: а)  $h_1=29$  мм;  $h_2=40$  мм; б)  $h_1=28$  мм;  $h_2=37$  мм; в)  $h_1=22$  мм;  $h_2=23$  мм

**Fig. 3.** Position of the cavitation cavern in the «water – diesel fuel» system with different layer thickness: а)  $h_1=29$  mm;  $h_2=40$  mm; б)  $h_1=28$  mm;  $h_2=37$  mm; в)  $h_1=22$  mm;  $h_2=23$  mm

В таблице показаны результаты экспериментальных и аналитических исследований процесса эмульгирования под воздействием ультразвуковых колебаний с частотой 30 кГц.

Из таблицы следует, что спрогнозированные области максимального воздействия ультразвуковых колебаний с большой степенью точности совпадают с местами проявления в экспериментальной системе акустической кавитации. Отклонения связаны с неоднородностью испытательных жидкостей при диспергировании фаз в области контакта, причем при длительном воздействии УЗК происходит одновременно диспергирование нижнего слоя жидкости в верхнем, и верхнего слоя в нижнем.

Механизм образования эмульсий представляет интерес еще и потому, что процессы разрушения эмульсий имеют некоторое сходство с процессами эмульгирования, но в обратной последовательности. Поэтому, имея представление о механизме эмульгирования, легче изучать процессы разрушения эмульсий и наоборот [20–22].

Наиболее эффективной следует считать такую технологическую схему создания и разрушения устойчивых эмульсий, в которой реализуется оп-

тимальный набор воздействующих факторов на поверхность раздела фаз при наименьших материальных затратах в течение отведенного для этих целей времени.

#### Заключение

Таким образом, согласно данной модели поверхность раздела фаз является не только объектом, ограничивающим форму тела, но и ключом к интенсификации тепло-массообменных процессов. Так, на примере воздействия колебаний ультразвукового диапазона на границу раздела фаз «жидкость–жидкость» можно доказать, что локальное воздействие энергетически более выгодно, чем подвод энергии ко всему объему рассматриваемой системы.

*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. 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.
2. 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.
3. 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.
4. 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.
5. Кудряшов Б.А., Ливанский А.Н., Нигметзянов Р.И. Перспективы использования ультразвукового эмульгирования в промышленности // Научно-технические технологии в машиностроении. – 2011. – № 6. – С. 25–28.
6. Hamida T., Babadagli T. Investigations on capillary and viscous displacement under ultrasonic waves // Journal of Canadian Petroleum Technology. – 2006. – V. 45. – № 2. – P. 16–19.
7. 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.
8. Кудряшова О.Б., Антонникова А.А. Математическая модель эволюции аэрозолей при ультразвуковом воздействии // Известия Томского политехнического университета. – 2013. – Т. 322. – № 2. – С. 160–163.
9. History of development and current state of hydrodynamic rotary mixers / E.A. Nikolaev, S.P. Ivanov, E.V. Boev, V.G. Afanashenko, N.S. Shulaev // Chemical and Petroleum Engineering. – 2010. – V. 46. – № 7. – P. 451–455.
10. Behrend O., Schubert H. Influence of hydrostatic pressure and gas content on continuous ultrasound emulsification // Ultrasonics Sonochemistry. – 2001. – V. 8. – № 3. – P. 271–276.
11. Cucheval A., Chow R.C.Y. A study on the emulsification of oil by power ultrasound // Ultrasonics Sonochemistry. – 2008. – V. 15. – № 5. – P. 916–920.
12. О возможности приготовления бензиноспиртовых и водотопливных эмульсий в роторном аппарате / Е.А. Николаев, Р.Р. Ширияздянов, Е.В. Боев, В.Г. Афанасенко // Ползуновский вестник. – 2010. – № 3. – С. 127–129.
13. Васильцов М.И., Лавренко Т.А. Изменение фракций зимнего дизельного топлива под действием ультразвуковой кавитации // Сборник научных трудов Ангарского государственного технического университета. – 2017. – № 14. – С. 24–27.
14. Иванов В.П., Дронченко В.А. Разрушение поверхности раздела двух несмешивающихся жидкостей при эмульгировании // Вестник Брестского государственного технического университета. – 2014. – № 4 (88). – P. 38–42.
15. Nikolaev E.A., Afanashenko V.G., Boev E.V. Experimental investigations of fuel blending process in rotary blenders // Chemical and Petroleum Engineering. – 2014. – V. 50. – № 3–4. – P. 162–168.
16. 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.
17. 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.
18. 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.

19. Emulsification in novel ultrasonic cavitation intensifying bag reactors / R. van Zwieten, B. Verhaagen, K. Schroën, D. Fernández Rivas // *Ultrasonics Sonochemistry*. – May 2017. – V. 36. – P. 446–453.
20. Поверхность и поверхностные явления / И.Р. Кузеев, Е.А. Наумкин, Ю.Н. Савичева, С.В. Попова. – Уфа: Изд-во «Нефтегазовое дело», 2009. – 144 с.
21. Поверхность кавитирующего пузырька / В.Б. Акопян, С.В. Альков, М.В. Бамбура, Ю.А. Ершов // *Машиностроитель*. – 2015. – № 12. – С. 10–15.
22. Наумкин Е.А. Методология прогнозирования ресурса нефтегазового оборудования, эксплуатируемого в условиях циклического нагружения, на стадии проектирования и эксплуатации: дис. ... д-ра техн. наук. – Уфа, 2011. – 244 с.

*Поступила 14.11.2017 г.*

#### **Информация об авторах**

**Афанасенко В.Г.**, кандидат технических наук, доцент кафедры технологических машин и оборудования Уфимского государственного нефтяного технического университета.

**Кузеев И.Р.**, доктор технических наук, профессор кафедры технологических машин и оборудования Уфимского государственного нефтяного технического университета.

**Ковшова Ю.С.**, кандидат технических наук, доцент кафедры технологических машин и оборудования Уфимского государственного нефтяного технического университета.

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

UDC 66.063.61

## EMULSIFICATION INTENSIFICATION UNDER SIMULTANEOUS IMPACT OF ORIGINAL AND REFLECTED ULTRASONIC VIBRATIONS

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

**Iskander R. Kuzeev**<sup>1</sup>,  
kuzeev2002@mail.ru

**Yuliya S. Kovshova**<sup>1</sup>,  
july52008@yandex.ru

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

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

**Relevance of the research.** Development and destruction of a steady compound of insoluble liquids are widely applied at all stages of life cycle of commercial hydrocarbons: from primary trade processing to deep processing of oil products. Intensification of both direct and inverse processes will allow reducing considerably the overall dimensions and metal consumption of necessary technology equipment that in its turn will facilitate transportation, reduce costs of mounting and repair. One of the most progressive methods of increasing efficiency of emulsifying is the process as a result of ultrasonic oscillations.

**The main aim** of the research is to determine the impact of inhomogeneous system impact on emulsifying intensity within the ultrasonic oscillation field.

**Methods:** general principles of propagation, reflection and interference of acoustic vibrations in liquid, experimental methods for research acoustic emulsification of immiscible liquids.

**Results.** The paper considers the mechanism of creating emulsion in interference of two counter waves of the ultrasonic range on the boundary of initial liquids contact. It is revealed that the greatest efficiency of dispersion is observed in case of resonant influence. The authors have determined analytically the dependence of the intensity of mechanical oscillations impact on arbitrary point of the system formed by two immiscible liquids in case of ultrasound distribution in the direction, normal in relation to boundary of the section of phases. Comparison of the results of analytical and pilot studies showed that the discrepancy of data disparity makes less than 10 % that allows, with sufficient accuracy, applying the described calculation procedure to optimize the constructions of devices for emulsifying the non-uniform compounds.

### Key words:

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

The research was carried out in Ufa State Petroleum Technological University within the initiative scientific project of fundamental nature on a state task of higher education institutions for 2017–2019 (no. 9.7294.2017/8.9, 31.01.2017) with assistance of interuniversity common use center «Regional research and production complex "Nedra"».

### REFERENCES

- 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.
- 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.
- Rudenko M.G., Lavrenyuk T.A., Vasiltsov 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.
- Ftwi Y., Hagos, Obed M., Ali, Rizalman Mamat, Abdul A., Abdullah. 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.
- 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.
- 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.
- 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.
- 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. In Rus.
- Nikolaev E.A., Ivanov S.P., Boev E.V., Afanasenko V.G., Shulaev N.S. History of development and current state of hydrodynamic rotary mixers. *Chemical and Petroleum Engineering*, 2010, vol. 46, no. 7, pp. 451–455.
- 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.
- Cucheval 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.

12. Nikolaev E.A., Shiriyazdanov R.R., Boev E.V., Afanasenko V.G. O vozmozhnosti prigotovleniya benzinospirtovykh i vodotoplivnykh emulsiy v rotornom apparate [On the possibility of making businessbereich and water-fuel emulsions in a rotary apparatus]. I, *Polzunovskiy vestnik*, 2010, vol. 3, pp. 127–129
13. Vasil'tsov M.I., Lavrenyuk T.A. Changing fractions of winter diesel fuel under the action of ultrasonic cavitation. *Collection of scientific works of the Angarsk state technical University*, 2017, no. 14, pp. 24–27. In Rus.
14. Ivanov V.P., Donchenko V.A. Destruction of the interface of two immiscible liquids in emulsification. *Vestnik of Brest state technical University*, 2014, no. 4 (88), pp. 38–42. In Rus.
15. Nikolaev E.A., Afanasenko V.G., Boev E.V. Experimental investigations of fuel blending process in rotary blenders. *Chemical and Petroleum Engineering*, 2014, vol. 50, no. 3–4, pp. 162–168.
16. Badretdinov A.M., Mamonov F.A., Valeev A.M., Zagirov R.Ya., Akhmetgaleev R.Z. Emulgirovanie vodoneftyanykh smesey v rabochikh organakh vintovykh nasosov [Emulsification of oil-water mixtures in working bodies of screw pumps]. *Problems of gathering, treatment and transportation of oil and petroleum products*, 2005, vol. 64, pp. 231–234.
17. 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.
18. 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.
19. Van Zwieten R., Verhaagen B., Schroën K., Fernández Rivas D. Emulsification in novel ultrasonic cavitation intensifying bag reactors. *Ultrasonics Sonochemistry*, May 2017, vol. 36, pp. 446–453.
20. Kuzeyev 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.
21. Akopyan V.B., Alcove S.V., Bambura M.V., Ershov Yu.A. Surface of cavitation bubble. *Mashinostroitel*, 2015, no. 12, pp. 10–15. In Rus.
22. Naumkin E.A. *Metodologiya prognozirovaniya resursa neftegazovogo oborudovaniya, ekspluatiruemogo v usloviyakh tsiklicheskogo nagruzheniya, na stadii proektirovaniya i ekspluatatsii*. Dis. Dokt. nauk [Methodology of forecasting resource of oil and gas equipment operating in conditions of cyclic loading, under design and operation. Dr. Diss.]. Ufa, 2011. 244 p.

Received: 14 November 2017.

#### Information about the authors

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

**Iskander R. Kuzeev**, Dr. Sc., professor, Ufa State Petroleum Technological University.

**Yuliya S. Kovshova**, Cand. Sc., associate professor, Ufa State Petroleum Technological University.

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