

## ДИСПЕРГИРОВАНИЕ СОСТАВА МАСЛО – ВОДА В РОТОРНО-КАВИТАЦИОННОЙ МАШИНЕ

А. С. Цымбалов, А. И. Ларина, С. А. Толстоухов, В. Н. Блиничев

15300, Россия, Иваново, пр. Шереметевский, д. 7, Ивановский государственный химико-технологический университет (ИГХТУ). E-mail: andrey180494@list.ru.

*В статье представляются результаты исследования процесса получения высокодисперсной эмульсии масло – вода в роторно-кавитационной машине. Показано влияние основных факторов на дисперсионные характеристики эмульсии (число оборотов ротора и тип ПАВ). Рассмотрена физическая картина диспергирования в роторной машине. Описана методика проведения опытов на коллоидно-кавитационной установке. В отличие от РПА (роторно-пульсационные аппараты) кавитация в данной конструкции развивается за счет наличия на роторе и статоре не прорезей, а многочисленных канавок. В материалах статьи также отражены особенности и характеристики поверхностно-активных веществ.*

**Ключевые слова:** эмульсия, роторно-кавитационная машина, диспергирование, поверхностно-активные вещества, кавитация.

## DISPERSION OF OIL – WATER COMPOSITION IN ROTARY CAVITATION MACHINE

A. S. Tsymbalov, A. I. Larina, S. A. Tolstoukhov, V. N. Blinichev

7, Sheremetievskiy Avenue, Ivanovo, 153000, Russia. Ivanovo State University of Chemistry and Technology.

*The article presents the results of a study of the process of obtaining a highly dispersed oil - water emulsion in a rotary - cavitation machine. The influence of the main factors on the dispersion characteristics of the emulsion (rotor speed and type of surfactant) is shown. The physical picture of dispersion in a rotary machine is considered. The technique of conducting experiments on a colloidal-cavitation installation is described. Unlike RPA (rotary - pulsation apparatuses), cavitation in this design develops due to the presence of notches, but numerous grooves on the rotor and stator. The materials of the article also reflect the features and characteristics of surfactants.*

**Key words:** emulsion, rotary-cavitation machine, dispersion, surfactants, cavitation.

Эмульсии – это дисперсные системы, при которых одна жидкая фаза (диспергированная фаза, внутренняя фаза) распределена в другой жидкой фазе (когерентная фаза, внешняя фаза). Размер капель дисперсной жидкости варьируется в пределах 0,1–100 мкм. Одной из фаз обычно является вода, вторая – масляная фаза, представляющую собой несмешивающуюся с водой органическую жидкость, часто углеводородную. В эмульсиях типа

«масло в воде» (эмульсии М/В) масляная фаза распределяется в водной фазе, а в случае эмульсий «вода в масле» (эмульсии В/М) верно обратное. Есть примеры, когда образуются несколько эмульсий (множественные эмульсии), то есть те, в которых М/В – эмульсия в масле (М/В/М) или В/М-эмульсия в воде (В/М/В) [1, 2].

Для эмульсий характерна молочная мутность. Мутность усиливается широким распределением

частиц по размерам и меньшим средним диаметром частиц.

Во время дестабилизации капли могут агломерироваться друг с другом, этот процесс называется флоккуляцией. Когда внутренняя фаза специфично легче, чем внешняя, как и большинство эмульсий М/В, частицы всплывают. При более высокой плотности внутренней фазы капли осаждаются. [3, 4]. Агломерация обратима; путем встряхивания или перемешивания первоначальное распределение частиц по размерам может быть восстановлено. В отличие от твердой дисперсии, капли эмульсии при дестабилизации могут стекаться, образуя процесс коалесценции.

Эмульсии могут быть стабильными как в течение нескольких часов, так и до нескольких лет. Они должны быть часто, около нескольких месяцев, храниться в стабильном тепле или холоде, а также быть нечувствительны к изменениям в химической среде (рН, добавление соли).

Тип эмульсии может легко и быстро обнаружен поведением эмульсии по отношению к воде. Только эмульсии типа М/В могут быть разбавлены водой или цветными реакциями [5]:

1. Капля эмульсии приводится в контакт с каплей воды. Если капли текут вместе, присутствует эмульсия М/В. Капля эмульсии В/М образует отчетливую граничную фазу капли воды.

2. Капля эмульсии М/В распространяется гораздо быстрее на фильтровальной бумаге, чем капля эмульсии В/М.

3. Водорастворимые красители, такие как метиленово-синий и малахитово-зеленый цвет, окрашивают капли эмульсии М/В.

При создании М/В – эмульсий, лучше всего использовать водорастворимые эмульгаторы, чем маслорастворимые, а для В/М – эмульсии, маслорастворимые эмульгаторы. Эмульгаторы или смеси эмульгаторов следует выбирать так, чтобы кинетическая энергия была достаточной для смешивания двух фаз.

При выборе поверхностно-активных веществ, для получения стабильных эмульсий, следует придерживаться принципу чисел ГЛБ – гидрофильно-липофильный баланс. Чем значительнее ГЛБ, тем больше баланс смещен в сторону гидрофильных свойств, и тем легче данное вещество растворяется в воде [6].

ПАВ с числом ГЛБ от 8 до 18 (гидрофильные) лучше растворимы в воде, чем в масле, и стабилизируют эмульсии 1-го рода, если величина ГЛБ от 3 до 6 (липофильные) стабилизируются эмульсии 2-го рода. Наиболее продуктивными эмульгаторами для получения прямых эмульсий являются натриевые соли жирных кислот (мыла), а также ал-

килсульфаты, алкилсульфонаты и т.д. Для обратных эмульсий в качестве эмульгаторов эффективнее всего использовать сорбитан тристеарат и сорбитан моноолеат [5, 7, 8].

Для реализации задачи получения высокодисперсных, устойчивых, водомасляных эмульсий в работе были применены 3 типа эмульгаторов: ЭПЛ-1, продукт на основе аммонийных солей сульфата алкилполиглицолиевого эфира, это экологически безопасный биоразлагаемый анионный эмульгатор, представляющий собой сиропообразную жидкость от светло-желтого до коричневого цвета.; СК-2 и СК-2 концентрат в качестве деэмульгаторов сырой нефти, основным действующим веществом является ди (2-этилгексил) сульфосукцинат. Данные эмульгаторы были введены в водную фазу с концентрацией 1–3 % от общего объема, поскольку для достижения эффективного разделения дисперсной фазы показатели межфазного поверхностного натяжения должны быть снижены с помощью минимальных возможных значений концентраций эмульгатора.

В данной работе в качестве неполярной фазы были использованы два типа масел. Одним из них является подсолнечное масло, а второй вид масла – трансформаторное. Структура подсолнечного масла состоит из: глицеридов пальмитиновой, стеариновой, арахиновой, лигноцериновой, олеиновой и линолевой кислот, линолевая – 46–62 %, олеиновая – 24–40 %, пальмитиновая – 3,5–6,4 %, стеариновая – 1,6–4,6 %, линоленовая – до 1 %, арахидиновая – 0,7–0,9 %, миристиновая – до 0,1 % кислоты, до 19,1 % белка, 26,5 % углеводов, около 2 % фитина, 1,5 % дубильных веществ, витамины А, В, D, Е, К, лецитин, минералы, инулин. Плотность масла при 10 °С 920–927 кг/м<sup>3</sup>, температура застывания от –16 до –19 °С, кинематическая вязкость при 20 °С 60,6·10<sup>-6</sup> м<sup>2</sup>/с, поверхностное натяжение подсолнечного масла – 30·10<sup>-3</sup> Н/м. Трансформаторное масло – очищенная фракция нефти, добываемая при перегонке, кипящая при температуре от 300 °С до 400 °С. Это вид масла состоит из следующих компонентов: парафины 10–15 %, нафтены или циклопарафины 60–70 %, ароматические углеводороды 15–20 %, асвальто-смолистые вещества 1–2 %, сернистые соединения < 1 %, азотистые соединения < 0,8 %, нафтеновые кислоты < 0,02 %, антиокислительная присадка (ионол) 0,2–0,5 %. Значимый фактор трансформаторных масел – устойчивость против окисления, т.е. способность масла сохранять свойства при многочасовой обработке. Из главных характеристик масла следует указать, что оно горючее, биоразлагаемое, не токсичное. Плотность масла лежит в диапазоне 0,84–0,89·10<sup>3</sup> кг/м<sup>3</sup>. Также следует учитывать

такой параметр, как вязкость. Чтобы качественно осуществлять свои дополнительные функции, масло должно иметь невысокую вязкость. Кинематическая вязкость для многих масел при температуре 20 °С равна  $28\text{--}30 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$ . Поверхностное натяжение трансформаторного масла находится в пределах  $30\text{--}34 \cdot 10^{-3} \text{ Н/м}$ .

В исследовательской работе для получения стабильных водомасляных эмульсий, помимо внедрения эмульгаторов, был применен метод диспергирования. Диспергирование – это процесс мельчайшего измельчения твердых тел или жидкости, в конечном итоге которого формируются дисперсные системы: суспензии, эмульсии, порошки, аэрозоли [9, 10].

Для образования эмульсии в системе вода/масло была изготовлена и испытана лабораторная установка (рис. 1), основной частью которой является роторно-кавитационная машина.

Исследования создания эмульсии в непрерывном режиме работы аппарата проводились следующим образом. Первым делом были прокалиброваны расходы воды, как функция высоты уровня жидкости в емкости для водной фазы, и расходы масла, как функция числа оборотов дозатора, регулируемого частотным преобразователем.

Коллоидно-кавитационная установка содержит исходную емкость для воды (20 л), сосуд для масла, соединенный с трубопроводом, входящим в роторно-кавитационный активатор через дозатор непрерывного действия.

Методика проведения каждого опыта по эмульгированию масла в воде заключается в следующем: раствор (вода и эмульгатор) поступает в ёмкость исходного продукта, в которой предварительно происходит смешивание, далее открывается шаровой кран на емкости (вода + ПАВ). Как только поток смеси подходил к патрубку подачи масла, включался дозатор для масляной фазы, открывался кран подачи масла в раствор (вода и эмульгатор), и запускался активатор. Поток диспергированной жидкости в объеме (2–4 л), полученный в неустановившемся режиме работы установки собирался отдельно, а для анализа дисперсионного состава и стабильности эмульсии отбирались пробы в стационарном режиме работы установки. Полученная эмульсия направлялась в сборник готового продукта, откуда сразу, после каждого опыта, отбиралась на анализ для определения дисперсионного состава эмульсии, размера капель и изучалась кинетика устойчивости. Дисперсионный состав эмульсии определялся сразу после ее получения, через сутки и 3 суток.

Процентное содержание масла в воде регулируется числом оборотов перистальтического насоса, а число оборотов ротора при помощи частотного преобразователя.

Число оборотов роторно-кавитационной машины изменялось в широком диапазоне: от 1500 об/мин до 6000 об/мин, за счет регулирования частоты тока двигателя кавитационного диспергатора.

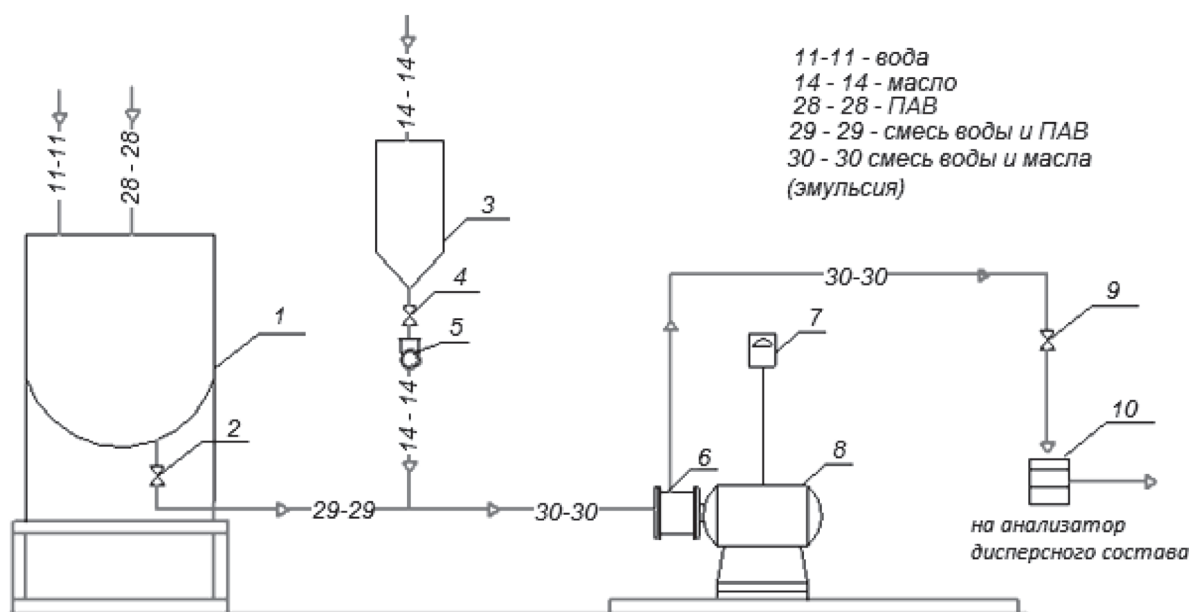
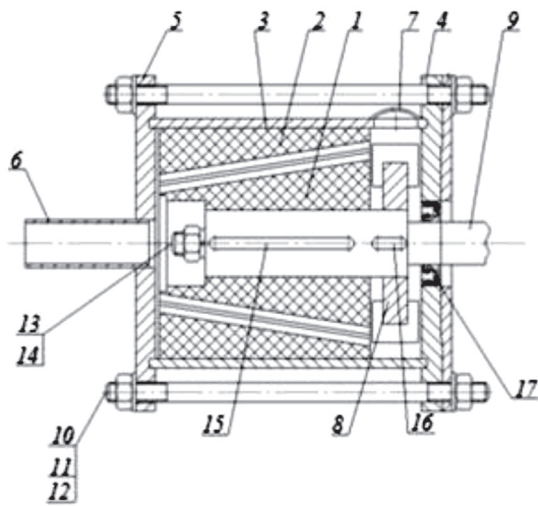


Рис. 1. Схема лабораторной установки

1 – емкость исходного продукта; 2, 4, 9 – кран; 3 – емкость для масла; 5 – перистальтический насос; 6 – роторно – кавитационный активатор; 7 – частотный преобразователь; 8 – электродвигатель; 10 – емкость конечного продукта



**Рис. 2. Роторно – кавитационный диспергатор**

- 1 – ротор; 2 – статор; 3 – корпус; 4 – задняя крышка;  
 5 – передняя крышка; 6 – входной патрубков;  
 7 – тангенциальный выходной патрубков;  
 8 – крыльчатка насоса; 9 – вал; 10 – шпилька;  
 11, 13 – гайка; 12, 14 – шайба; 15, 16 – шпонка;  
 17 – манжета

На установке были проведены десятки опытов при различных оборотах ротора и разных видах ПАВ.

На рис. 2 представлена схема роторно – кавитационного диспергатора.

Принцип действия роторно-кавитационного диспергатора заключается в том, что смесь, подвергающаяся активации, поступает во входной патрубков 6 диспергатора, в результате наличия разрежения, создающегося за счет крыльчатки насоса 8 с радиальными лопастями и быстровращающегося ротора, выполненным в виде усеченного конуса из капролона с каналами. Активируемая смесь проходит через узкий кольцевой зазор между ротором 1 и статором 2, испытывая большие сдвиговые напряжения, пропорциональные вязкости смеси и градиенту линейной скорости по радиусу зазора [11]. Так как на статоре 2 и роторе 1 находится большое количество канавок, то при вращении ротора за счёт канавок в смеси мгновенно образуются кавитационные пузырьки, создавая локальные нормальные напряжения импульса давления. Схлопывающиеся кавитационные пузырьки резко интенсифицируют процесс диспергирования капель масла [10, 12–14].

Конический ротор 1 закреплен на валу 9, имеющий шпоночные пазы 15, 16 при помощи гайки 13 с шайбой 14. Статор 2 установлен в корпусе 3 диспергатора и зафиксирован в нём штифтами. Активатор снабжен крыльчаткой насоса 8. Для воз-

можности быстрой сборки и разборки, статор диспергатора герметично стянут шпильками 10 и гайками 11 с шайбой 12, между передней крышкой 5 и задней крышкой 4. Для устранения утечки, активируемой смеси, в зазоре между крышкой и валом установлена манжета 17.

Диспергирование капель эмульсий осуществляется за счет кавитационных пузырьков, образованных в ее области из-за рассеяния ударной волны [10]. В развитой кавитационной области общее число кавитационных пузырьков во много раз превышает количество зародышей. Внутри кавитационной области происходит непрерывный процесс размножения и коагуляции кавитационных пузырьков. В данный момент характер кавитационной области, в которой образуются кавитационные пузырьки, зависит от множества факторов: коалесценция пузырьков, потоки на границе пузырька и внутри кавитационной области, газосодержание, изменение пульсации пузырька и т.д. [10, 11].

Касательные напряжения сдвига определяются по уравнению:

$$\tau = 2 \cdot \mu \left( \frac{dv}{dR} \right)^n,$$

где  $\mu$  – вязкость смеси;  $\left( \frac{dv}{dR} \right)$  – градиент скорости

потока в зазоре между ротором и статором, где  $dR$  – изменение размера зазора между ротором и статором.

На диспергирование масла действуют три основные силы:

- 1) Касательное напряжение сдвига по уравнению (1).
- 2) Мощная кинетическая энергия при схлопывании кавитационного пузырька.
- 3) Кинетическая энергия в зонах, где действуют большие локальные пульсационные скорости.

Схема ротор – статор представлена на рис. 3.

При однократном пропускании смеси через роторно – кавитационную машину большое влияние оказывает число оборотов ротора на дисперсионный состав эмульсии.

Как показывают результаты исследования, при числе оборотов ротора 3000 об/мин средний размер частиц масла в эмульсии был равен 2,42 мкм, при 4500 об/мин – изменился незначительно и составлял 2,4 мкм, а при 6000 об/мин – был равен 1,93 мкм.

На рисунках 3 и 4 представлены фотографии эмульсий, полученных при добавлении в воду разных типов эмульгаторов. На рис. 3 получена эмульсия с использованием ПАВ ЭПЛ-1, а на рис. 4 СК-2.

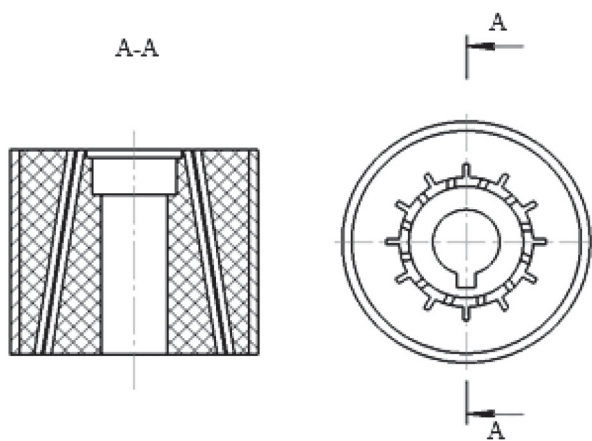


Рис. 3. Схема ротор – статор



Рис. 4. Эмульсия М/В при 6000 об/мин (ПАВ ЭПЛ-1) под 400 – кратным увеличением микроскопа

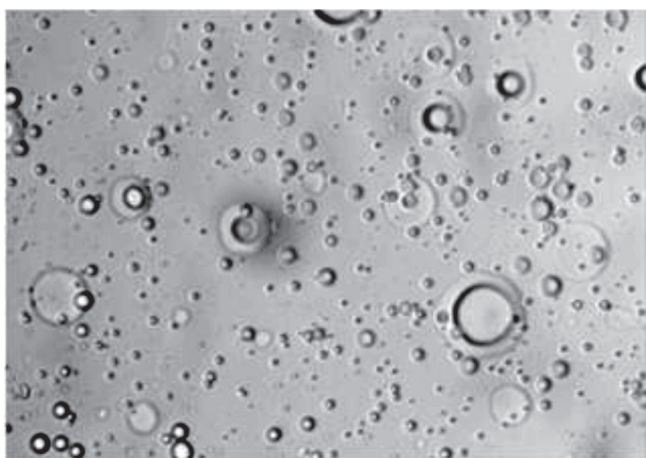


Рис. 5. Эмульсия М/В при 6000 об/мин (ПАВ СК-2) под 400 – кратным увеличением микроскопа

На изображениях наглядно видно, что тип эмульгатора влияет на дисперсионные характеристики получаемых эмульсий. Еще большее влияние тип эмульгатора оказывает на устойчивость эмульсии.

На представленных фотографиях видно, что ионогенные эмульгаторы (ЭПЛ-1, СК-2) образовали пленку на граничной поверхности капле дисперсной системы, опуская свои полярные, гидрофильные концевые группы в водную фазу и направляя гидрофобные группы в неполярную масляную фазу [5, 6, 8]. ПАВ результативно адсорбировались на межфазной границе, проявляя тем самым поверхность активностью. Созданная эмульгаторами пленка не позволяет мелким каплям слипаться в более крупные и далее образовывать сплошную пленку, что может привести к расслоению фазы и дестабилизации эмульсий.

### Заключение

1) На основе комплексного анализа осуществлён выбор диспергирующего устройства (роторно-кавитационная машина), принцип действия которого заключается в получении высокодисперсных устойчивых эмульсий за счет сдвиговых напряжений между элементами ротора и статора.

2) Установлено влияние на качество эмульсии, получаемой в аппарате проточного типа, при помощи таких параметров, как: количество диспергирующих элементов и физических свойств используемых жидкостей.

3) Отражены особенности и характеристики, применяемых в работе поверхностно – активных веществ (ЭПЛ-1, СК-2, СК-2 конц.), а также видов масел, которые использовались в исследовательской работе в качестве масляной фазы.

4) На основе экспериментальных данных исследований процесса эмульгирования и кавитационного воздействия были получены изображения эмульсии М/В при 6000 об/мин роторно-кавитационной установки с использованием эмульгатора ЭПЛ-1 и СК-2, сделанные на микроскопе при 400-кратном увеличении.

### Литература

1. Фридрихсберг Д.А. Курс коллоидной химии. 2-е изд. Л.: Химия, 1984. 368 с.
2. Фролов Ю.Г. Курс коллоидной химии. М.: Химия, 1988. 464 с.
3. Heusch R. Naturwissenschaften. 1992. № 10. P. 450–456.
4. Myers D. Surfaces, Interfaces, and Colloids, 2nd Ed., Wiley-VCH, New York, 1999. 501 p.

5. *Lagaly G., Schulz O., Zimehl R.* Dispersionen und Emulsionen. Eine Einführung in die Kolloidik feinverteilter Stoffe einschließlich der Tonminerale. Mit einem historischen Beitrag über Kolloidwissenschaftler von Klaus Beneke. Steinkopff Verlag, Darmstadt, Germany. 1997. 560 p.
6. *Schulman J, Cockbain E.* Trans Faraday Soc. 1940. P. 661–668.
7. *Griffin W.C.* Journal of the Society of Cosmetic Chemists. 1949. №1. P. 311–326.
8. *Цымбалов А.С.* Современные наукоемкие технологии. Региональное приложение. 2018. №3 (55). С. 108–119.
9. *Кардашев Г.А.* Физические методы интенсификации процессов химической технологии / Г.А. Кардашев. – М.: Химия. 1990. 208 с.
10. *Промтов М.А.* Пульсационные аппараты роторного типа: теория и практика / М.А. Промтов. – М.: Машиностроение-1. 2001. 260 с.
11. *Цымбалов А.С, Блиничев В.Н.* Современные наукоемкие технологии. Региональное приложение. 2018. №4 (56). С. 100–107.
12. *Федоткин И.М.* Использование кавитации в технологических процессах / И.М. Федоткин, А.Ф. Немчин. К.: Вища шк. 1984. 68 с.
13. *Балабудкин М.А.* Роторно-пульсационные аппараты в химико-фармацевтической промышленности / М.А. Балабудкин. – М.: Медицина. 1983. 160 с.
14. *Балабышко А.М.* Роторные аппараты с модуляцией потока и их применение в промышленности / А.М. Балабышко, В.Ф. Юдаев. – М.: Недра. 1992. 176 с.