

ИССЛЕДОВАНИЕ ОСОБЕННОСТЕЙ КОАГУЛЯЦИИ И КОАЛЕСЦЕНЦИИ ЭМУЛЬСИОННЫХ КАПЕЛЬ В ЭЛЕКТРОМАГНИТНОМ ПОЛЕ

© Р. Р. Зиннатуллин*, А. И. Муллаянов, Р. М. Амекачев

Башкирский государственный университет

Россия, Республика Башкортостан, 450076 г. Уфа, ул. Заки Валиди, 32.

Тел.: +7 (347) 229 96 43.

*Email: rasulz@yandex.ru

В работе исследуются процессы коагуляции и коалесценции эмульсионных капель под воздействием электромагнитных полей. Притяжение эмульсионных капель в электромагнитном поле, образование коагуляционных цепочек и дальнейшая их коалесценция обусловлено преимущественно действием на капли диэлектрофоретической силой. Частота электромагнитного поля, при которой наблюдается наиболее эффективное притяжение капель, находится в диапазоне 70–100 кГц. По результатам исследований определены критические напряженности поля необходимые для коагуляции и коалесценции эмульсионных капель в зависимости от количественного содержания асфальтенов в несущей фазе эмульсии. Обнаружена тенденция увеличения критических напряженностей поля, при которых происходит коагуляция и коалесценция капель с увеличением количественного содержания асфальтенов в эмульсии.

Ключевые слова: эмульсия, бронирующая оболочка, асфальтены, электромагнитное поле, диэлектрофорез, напряженность поля, коагуляция, коалесценция.

Введение

Обезвоживание нефтепродуктов является одной из важнейших задач в технологических процессах переработки нефти и газа. Суть обезвоживания (разделения эмульсий) заключается в укрупнении (коалесценции, коагуляции) капель воды диспергированных в нефти с последующим отводом образовавшегося слоя воды.

Эмульсия «вода в нефти» представляет собой гетерогенную систему, состоящую из очень мелких (до 50 мкм) капель воды, диспергированных в нефти. Каждая капля окружена так называемой бронирующей оболочкой толщиной 50–100 нм, состоящей из полярных компонентов нефти. Бронирующая оболочка препятствует коалесценции капель воды. Такие эмульсии фактически не могут быть разрушены обычными методами (центрифугирование, нагрев, использование деэмульгаторов) [1].

Один из перспективных методов разрушения водонефтяных эмульсий – использование электромагнитных (ЭМ) полей [1–4]. Результаты исследований воздействия НЧ и ВЧ электромагнитного поля на модельные эмульсии показали, что под действием электромагнитного поля образуются агрегаты капель в виде цепочек, вытянутых преимущественно вдоль направления силовых линий электрического поля [4]. Частота электромагнитного поля, при которой наблюдается наиболее эффективное образование цепочек, находится в диапазоне 70–100 кГц. Притяжение капель воды в электромагнитном поле и образование коагуляционных цепочек обусловлено преимущественно действием на капли диэлектрофоретической силой, определяемой следующим видом [5]:

$$\bar{F}_{DEP} = 2\pi\epsilon_1 R^3 \left(\frac{\epsilon_2 - \epsilon_1}{\epsilon_2 + 2\epsilon_1} \right) \nabla E_0^2 \quad (1)$$

где ϵ_1 – диэлектрическая проницаемость среды, ϵ_2 – диэлектрическая проницаемость капли, R – радиус капли, E_0 – напряженность внешнего электрического поля.

Сближение капель воды под действием диэлектрофоретической силы происходит до тех пор, пока на некотором расстоянии силы притяжения не будут уравновешены силами отталкивания бронирующих оболочек

капель. При критической напряженности электрического поля преодолевается энергетический барьер сил отталкивания и происходит слияние капель воды. Энергетический барьер сил отталкивания зависит от прочностных свойств бронирующей оболочки, что в свою очередь должно зависеть от количественного содержания природных стабилизаторов в нефти (асфальтены, смолы).

Объекты исследования

В работе исследовалось воздействие электромагнитного поля на отдельные капли модельных эмульсий с различным содержанием асфальтенов. Модельная эмульсия представляла собой капли воды, покрытые асфальтеновой оболочкой, в гептане. Процедура приготовления модельной эмульсии следующая [6]:

- асфальтены (1–8% к объему эмульсии) растворяются в толуоле в течение 2-х часов;
- в полученный раствор добавляется гептан в равных долях к толуолу и перемешивается в течение 2-х часов в мешалке при скорости 500 об/мин;
- в полученный раствор добавляется очищенная вода (Milli-Q) в объеме 20% к объему эмульсии и перемешивается в течение 20 минут в мешалке при скорости 3000 об/мин.

Методика эксперимента

Для исследования воздействия электромагнитного поля на эмульсионные капли использовался лабораторный стенд, подробное описание которого приводится в работе [4]. Важным узлом стенда является микрожидкостная ячейка (рис. 1).

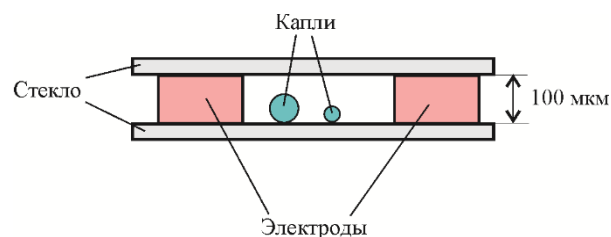


Рис. 1. Микрожидкостная ячейка.

Ячейка состоит из двух параллельных медных электродов, герметично помещенных между двумя

стеклянными пластинами. В ячейку подается разряженная эмульсия и в центре между двумя электродами фиксируются две капли разного диаметра на расстоянии 10–30 мкм друг от друга. В каждом эксперименте подбирается пара капель так, чтобы радиусы большой и малой капли в определенной степени совпадали. Радиус большой капли $R = 60 \pm 3$ мкм, радиус малой капли $r = 20 \pm 3$ мкм. Затем на электроды подается сигнал частотой 10–200 кГц и амплитудой из диапазона 50–130 В начиная с минимальной амплитуды. Фиксируются значения амплитуды, при котором происходит коагуляция и коалесценция капель. Исследования проводились для эмульсий с различным количественным содержанием асфальтенов.

Результаты и их обсуждение

На рис. 2 представлены фрагменты из видео воздействия электромагнитного поля частотой 100 кГц и амплитудой 120 В на эмульсию с содержанием асфальтенов 1% к общему объему эмульсии. Длительность действия поля – 1 с. Радиус неподвижной капли R равен 5 мкм, подвижной $r = 17$ мкм.

При отсутствии капель в центре ячейки между двумя электродами электромагнитное поле однородно, т.е. напряженность поля постоянна. Появление капли нарушает однородность поля вокруг капли и на определенном расстоянии возникает градиент напряженности электрического поля. Капли меньшего радиуса находящиеся в области неоднородности притягиваются к этой капле. При достижении амплитуды поля 112 кВ/м капля с меньшим радиусом начинает двигаться к большой капле. Когда напряженность электромагнитного поля достигает значения 117 кВ/м, система из двух капель поворачивается по направлению поля. При достижении напряженности 120 кВ/м происходит коалесценция капель.

Аналогичным образом экспериментально были установлены критические напряженности необходимые для коагуляции и коалесценции отдельных глобул воды в электромагнитном поле для каждого образца эмульсии с различным количественным содержанием асфальтенов. В табл. представлены критическая напряженность коагуляции $E_{кр1}$ и критическая напряженность коалесценции $E_{кр2}$ для образцов эмульсий с различным количественным содержанием асфальтенов.

Из табл. видно, что наблюдается тенденция увеличения критических напряженностей с увеличением содержания асфальтенов в эмульсии. Для $E_{кр1}$ это связано с увеличением адгезионных сил удерживающих каплю на поверхности стекла. Для $E_{кр2}$ это связано с увеличе-

нием толщины слоя, а следовательно и прочности бронирующих оболочек капель. $E_{кр2}$, в отличие от $E_{кр1}$, стабилизируется при концентрациях асфальтенов в эмульсии выше 5%. Этот факт можно объяснить тем, что при концентрациях выше 5% достигается насыщение адсорбционного слоя бронирующей оболочки и адсорбция уже не зависит от концентрации асфальтенов в эмульсии [7]. Однако стабилизаторами реальных эмульсий являются не только асфальтены, но также и смолы, парафины в совокупности. Поэтому дальнейшие исследования необходимо проводить с добавлением в эмульсии смол и парафинов в определенных соотношениях.

Заключение

Таким образом, выявлены механизмы коагуляции и коалесценции эмульсионных капель под воздействием электромагнитных полей. Определены критические напряженности поля необходимые для коагуляции и коалесценции эмульсионных капель в зависимости от количественного содержания асфальтенов в эмульсии. Обнаружена тенденция увеличения критических напряженностей поля, при которых происходит коагуляция и коалесценция капель с увеличением количественного содержания асфальтенов в эмульсии.

Таблица
Критические напряженности коагуляции
и коалесценции в зависимости
от содержания асфальтенов в эмульсии

№об- разца	Содержание асфаль- тенов, %	$E_{кр1}$, кВ/м	$E_{кр2}$, кВ/м
1	1.0	117	120
2	2.0	119	123
3	3.0	120	124
4	4.0	122	126
5	5.0	125	127
6	6.0	130	128
7	7.0	135	128
8	8.0	136	128

В связи с тем, что стабилизаторами реальных эмульсий являются не только асфальтены, но также и смолы, парафины в совокупности, то дальнейшие исследования планируется проводить с добавлением в эмульсии смол и парафинов в определенных соотношениях.

Полученные результаты могут быть использованы в дальнейших исследованиях прочностных свойств бронирующих оболочек эмульсионных капель.

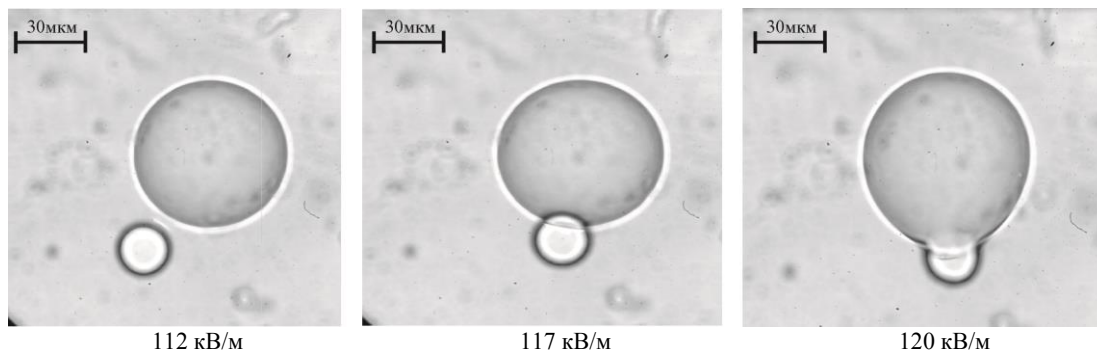


Рис. 2. Кадры из видео воздействия электромагнитного поля на эмульсионные капли.

Работа выполнена при поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации (государственное задание №3.1251.2014/К) и гранта РФФИ №14-01-97005.

ЛИТЕРАТУРА

1. Kovaleva L. A., Zinnatullin R. R., Minnigalimov R. Z. Destruction of Water-in-Oil Emulsions in Radio-Frequency and Microwave Electromagnetic Field // *Energy Fuels*. 2011. V. 25. №8. P. 3731–3738.
2. Хабибуллин И. Л., Назмутдинов Ф. Ф. К теории нагрева сред электромагнитным излучением. // *Вестник Башкирского университета*. 2014. Т. 19. №2. С. 381–384.
3. Фатхуллина Ю. И., Мусин А. А., Зиннатуллин Р. Р., Ковалева Л. А., Ахатов И. Ш. Численное моделирование сверхвысокочастотного электромагнитного нагрева эмульсионной капли // *Вестник Башкирского университета*. 2012. Т. 17. №4. С. 1666–1670.
4. Ковалева Л. А., Зиннатуллин Р. Р., Муллаянов А. И., Мавлетов М. В., Благочиннов В. Н. Эволюция микроструктуры водонефтяных эмульсий в высокочастотных и сверхвысокочастотных электромагнитных полях. // *Теплофизика высоких температур*. 2013. Т. 51. №6. С. 952–954.
5. Jones T. B. *Electromechanics of particles*. Cambridge University Press, 2005. 265 с.
6. JD McLean, PM Spiecker, AP Sullivan, PK Kilpatrick. In: OC-Mullins, EYSheu, eds. *Structures and Dynamics of Asphaltenes*. New York: Plenum Press, 1998, pp. 377–422.
7. Зиннатуллин Р. Р., Фатхуллина Ю. И., Камалтдинов И. М. Исследование образования адсорбционной пленки методом высокочастотной диэлектрической спектроскопии. // *Теплофизика высоких температур*. 2012. Т. 50. №2. С. 316–317.

Поступила в редакцию 28.04.2015 г.

STUDY OF THE FEATURES OF COAGULATION AND COALESCENCE OF EMULSION DROPLETS IN AN ELECTROMAGNETIC FIELD

© R. R. Zinnatullin*, A. I. Mullayanov, R. M. Amekachev

Bashkir State University

32 Zaki Validi St., 450076 Ufa, Republic of Bashkortostan, Russia.

Phone: +7 (347) 229 96 43.

Email: rasulz@yandex.ru

In this article, the authors study the processes of coagulation and coalescence of emulsion droplets exposed to electromagnetic fields. The attraction of the emulsion droplets in an electromagnetic field, the formation of coagulation chains and their coalescence of droplets due to the action on the dielectrophoresis. The article describes the laboratory bench and methods of sample preparation studies. The frequency of the electromagnetic field in which there is an effective attraction of droplets is in the range 70–100 kHz. According to the results of the study, the critical field strength required for coagulation and coalescence of emulsion droplets was identified. Critical electromagnetic field strength for different test samples varies and is of the order of 10^5 V/m. The studies were conducted for the samples with different content of asphaltene in the carrier phase. The tendency of increasing of the critical field strength at which the coagulation and coalescence of the droplets with an increase in the quantitative content of asphaltenes in the emulsion was revealed. The results will be used in further studies of the properties of the shells booking the emulsion droplets.

Keywords: *emulsion, droplet membranes, asphaltenes, electromagnetic field, dielectrophoresis, field strength, coagulation, coalescence.*

Published in Russian. Do not hesitate to contact us at bulletin_bsu@mail.ru if you need translation of the article.

REFERENCES

1. Kovaleva L. A., Zinnatullin R. R., Minnigalimov R. Z. *Energy Fuels*. 2011. Vol. 25. No. 8. Pp. 3731–3738.
2. Khabibullin I. L., Nazmutdinov F. F. *Vestnik Bashkirskogo universiteta*. 2014. Vol. 19. No. 2. Pp. 381–384.
3. Fatkhullina Yu. I., Musin A. A., Zinnatullin R. R., Kovaleva L. A., Akhatov I. Sh. *Vestnik Bashkirskogo universiteta*. 2012. Vol. 17. No. 4. Pp. 1666–1670.
4. Kovaleva L. A., Zinnatullin R. R., Mullayanov A. I., Mavletov M. V., Blagochinnov V. N. *Teplofizika vysokikh temperatur*. 2013. Vol. 51. No. 6. Pp. 952–954.
5. Jones T. B. *Electromechanics of particles*. Cambridge University Press, 2005.
6. JD McLean, PM Spiecker, AP Sullivan, PK Kilpatrick. In: OCMullins, EYSheu, eds. *Structures and Dynamics of Asphaltenes*. New York: Plenum Press, 1998, pp. 377–422.
7. Zinnatullin R. R., Fatkhullina Yu. I., Kamaltdinov I. M. *Teplofizika vysokikh temperatur*. 2012. Vol. 50. No. 2. Pp. 316–317.

Received 28.04.2015.