

УДК 537.868

ЛАБОРАТОРНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ РАЗДЕЛЕНИЯ РАЗЛИЧНЫХ ВОДОНЕФТЯНЫХ ЭМУЛЬСИЙ В ВЫСОКОЧАСТОТНОМ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОМ ПОЛЕ

© 2023 г. Р. Р. Зиннатуллин*, Л. А. Ковалева**

Уфимский университет науки и технологий, г. Уфа, Башкортостан, Россия

**E-mail: rasulz@yandex.ru*

***E-mail: liana-kovaleva@yandex.ru*

Поступило в редакцию 06.06.2023 г.

После доработки 02.10.2023 г.

Принято к публикации 03.10.2023 г.

Исследуется разделение водонефтяных эмульсий, отличающихся содержанием и соотношением асфальтосмолистых веществ, а также диэлектрическими свойствами при воздействии на них высокочастотным электромагнитным полем. Приводятся результаты экспериментальных исследований, показывающие корреляцию степени разделения фаз от диэлектрических параметров и соотношения содержания в нефтях асфальтенов и смол. Показано, что при воздействии высокочастотным электромагнитным полем на водонефтяные эмульсии степень нагрева и эффективность фазоразделения эмульсии зависят от суммарного содержания асфальтенов и смол, их соотношения, попадания рабочей частоты генератора в область резонансных частот эмульсий.

DOI: 10.31857/S0040364423050228

ВВЕДЕНИЕ

Во многих процессах нефтедобычи при совместной прокачке нефти и воды образуются устойчивые водонефтяные эмульсии, стабилизированные природными высокомолекулярными компонентами нефти (асфальтены, смолы, парафины). Важной задачей при промышленной подготовке нефти является отделение воды, т.е. разделение водонефтяных эмульсий на нефть и воду. Суть разделения эмульсий заключается в коалесценции капель воды, диспергированных в нефти. Эмульсия “вода в нефти” представляет собой гетерогенную систему, состоящую из капель воды размером 1–50 мкм, диспергированных в нефти. Каждая капля окружена так называемой бронирующей оболочкой толщиной 50–100 нм, состоящей из полярных компонентов нефти (преимущественно асфальтено-смолистые соединения). Бронирующая оболочка препятствует коалесценции капель воды. Такие эмульсии трудно разрушаются обычными методами (центрифугирование, нагрев, использование деэмульгаторов). Одним из перспективных методов разрушения водонефтяных эмульсий может оказаться использование физических полей: акустических, магнитных, электромагнитных полей разных диапазонов частот. Воздействия различными физическими полями для деэмульгирования водонефтяных эмульсий исследуются многими научными группами. В работах [1, 2] показано, что в акустических полях может происходить деэмуль-

гирование водонефтяных эмульсий. Коагуляция эмульсионных капель происходит в узлах стоящей волны акустического поля. При этом акустическое поле не оказывает непосредственного действия на бронирующую оболочку эмульсионных капель. Показано, что дестабилизировать эмульсии можно также наложением на дисперсную систему магнитного поля [3]. Сущность обработки водонефтяных систем заключается в том, что происходит разрушение надмолекулярных агрегатов железа под влиянием магнитного поля или из-за влияния парамагнитных частиц, находящихся в коллоидных мицеллах, взаимодействующих с внешним магнитным полем. В [4, 5] описывается возможный механизм разрушения эмульсии под действием низкочастотного электромагнитного поля, заключающийся в резонансной дестабилизации водородных связей в водных глобулах. Показано, что при использовании деэмульгаторов и низкочастотного электромагнитного поля обводненность нефти уменьшается на 40–49%, и при этом снижаются дозировка деэмульгатора, температура и время отстоя. В [6] показано, что для всех типов эмульсий высокочастотное (ВЧ) электромагнитное воздействие более эффективно, чем сверхвысокочастотное (СВЧ) электромагнитное воздействие при низком содержании воды. С увеличением содержания воды возрастает эффективность СВЧ электромагнитного воздействия.

Эмульсии с низким содержанием воды более устойчивы к разрушительным методам воздей-

ствия. Поэтому актуальной задачей является разработка методов разрушения мелкодисперсных водонефтяных эмульсий с низким содержанием водной фазы. В [7] исследована эффективность разрушения эмульсий с различным содержанием водной фазы (25–65%) в ВЧ электромагнитном поле. Показано, что при ВЧ электромагнитном воздействии энергия рассеивается и переходит в тепловую энергию в бронирующей оболочке, окружающей каплю воды. Максимальная эффективность этого процесса достигается при попадании частоты накладываемого ВЧ электромагнитного поля в область резонансных частот колебаний высокомолекулярных полярных компонентов нефти, сосредоточенных в бронирующей оболочке (асфальтенов, смол). При этом, кроме теплового воздействия, включается механизм разрушающего действия поля на структуру высокомолекулярных соединений нефти. Однако исследования выполнены для эмульсий на основе одной нефти с различным содержанием воды. Разница в диэлектрических параметрах обусловлена различными объемами воды и, как следствие, вязкостью эмульсии [8]. В [9, 10] исследованы диэлектрические свойства реальных нефтей и эмульсий на их основе с одинаковым содержанием водной фазы – 10%. В результате проведенных исследований обнаружено, что диэлектрические параметры нефтей различных месторождений зависят от соотношения содержания смол и асфальтенов в нефти, что объясняется расщеплением асфальтеновых агломератов смолами с ростом их содержания по отношению к асфальтенам.

Таким образом, степень воздействия ВЧ электромагнитного поля на водонефтяные эмульсии зависит от многих факторов: содержания высокомолекулярных соединений и их соотношений, количества воды, диэлектрических свойств водонефтяных эмульсий, частоты электромагнитного поля и времени воздействия.

Актуальной задачей является исследование особенностей воздействия электромагнитных полей ВЧ-диапазона на водонефтяные эмульсии с одинаковым содержанием водной фазы, но различными содержаниями высокомолекулярных соединений и диэлектрическими свойствами при определенных параметрах электромагнитного поля для выявления закономерностей поведения водонефтяных эмульсий в ВЧ электромагнитных полях.

наковым содержанием водной фазы, но различными содержаниями высокомолекулярных соединений и диэлектрическими свойствами при определенных параметрах электромагнитного поля для выявления закономерностей поведения водонефтяных эмульсий в ВЧ электромагнитных полях.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ И РЕЗУЛЬТАТЫ

В качестве объектов исследования использовались модельные водонефтяные эмульсии с одинаковым содержанием водной фазы, приготовленные на основе реальных нефтей и соответствующих пластовых вод. Приготовлены обратные водонефтяные эмульсии с содержанием водной фазы 10% на верхнеприводной мешалке при скорости вращения 3000 об/мин в течение 45 мин при комнатной температуре. Так как степень воздействия ВЧ электромагнитного поля на нефть или эмульсию зависит от диэлектрических параметров и их дисперсии, определены области поляризации полярных компонентов исследуемых эмульсий [9].

Далее водонефтяная эмульсия обрабатывается ВЧ (13.56 МГц) электромагнитным полем в динамическом режиме при расходе 10 мл/с. Принципиальная схема лабораторного стенда для исследования ВЧ-воздействия на водонефтяные эмульсии в динамическом режиме описана в работах [6, 10]. Исходная эмульсия из емкости при помощи насоса прокачивается через ВЧ-реактор в мерный цилиндр. На входе и выходе из ВЧ-реактора определяется температура эмульсии. Рабочий объем ВЧ-реактора – 200 см³. После обработки определяется динамика отстоя в течение 2 ч.

В таблице представлены содержания асфальтов и смол в эмульсиях, их отношения C_R/C_A , максимальное значение тангенса угла наклона кривой диэлектрических потерь $\text{tg} \delta$, количество отслоившейся воды W из исследуемых эмульсий после ВЧ электромагнитной обработки, резонансная частота эмульсии $f_{\text{рез}}$ и температуры нагрева T эмульсий при ВЧ электромагнитной обработке.

Параметры эмульсий при ВЧ электромагнитной обработке

№ образца	Асфальтены + смолы, об. %	C_R/C_A	$\text{tg} \delta$ (max)	$f_{\text{рез}}$	W , %	T , °C
1	11.60	0.328	0.014	17.0	38.9	32.2
2	17.79	0.072	0.019	5.0	65.0	38.8
3	17.12	0.097	0.020	9.0	75.3	42.1
4	20.70	0.125	0.034	12.0	90.5	48.6
5	17.80	0.171	0.023	15.0	81.3	44.5
6	14.32	0.193	0.017	5.0	54.2	34.2
7	14.60	0.281	0.016	4.0	47.3	35.4
8	13.97	3.281	0.015	4.0	40.7	33.0

Для исследованных эмульсий при ВЧ электромагнитном воздействии количество отслоившейся воды и интенсивность нагрева эмульсии на основе разных нефтей различаются. Это связано, во-первых, с содержаниями в нефти полярных компонент (асфальтены, смолы) и их соотношением, во-вторых, с попаданием частоты электромагнитного поля в область поляризации полярных компонент нефти.

На рис. 1 представлены графики зависимостей количества отслоившейся воды и температуры нагрева эмульсий от суммарного содержания асфальтенов и смол в нефти, на основании которой изготавливались модельные эмульсии. С увеличением суммарного содержания асфальтенов и смол в нефти увеличиваются количество отслоившейся воды и температура нагрева эмульсии. При этом количество отслоившейся воды увеличивается больше, чем температура эмульсии, что говорит о разрушении эмульсии не только за счет нагрева, а в основном за счет механического воздействия поля на полярные компоненты нефти, т.е. за счет их диэлектрической поляризации. Аналогичные зависимости от соотношения содержаний смол и асфальтенов представлены на рис. 2. Количество отслоившейся воды и температуры эмульсий при ВЧ-воздействии проходят через максимум при соотношении содержаний смол и асфальтенов, равном 8 : 1. Количество отслоившейся воды при дан-

ном соотношении также достигает более высоких значений, чем температура.

На рис. 3 представлены зависимости количества отслоившейся воды и температуры нагрева при ВЧ-обработке от резонансной частоты, т.е. от частоты, соответствующей максимальному зна-

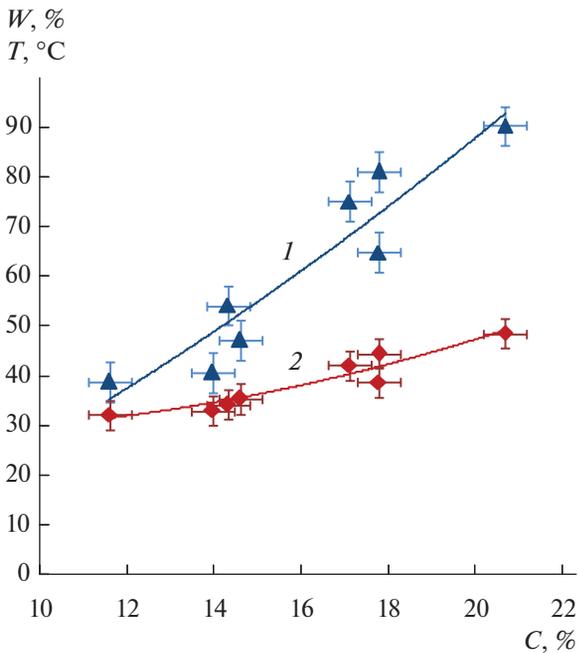


Рис. 1. Зависимости количества отслоившейся воды W (1) и температуры нагрева T (2) для исследуемых эмульсий от суммарного содержания асфальтенов и смол C .

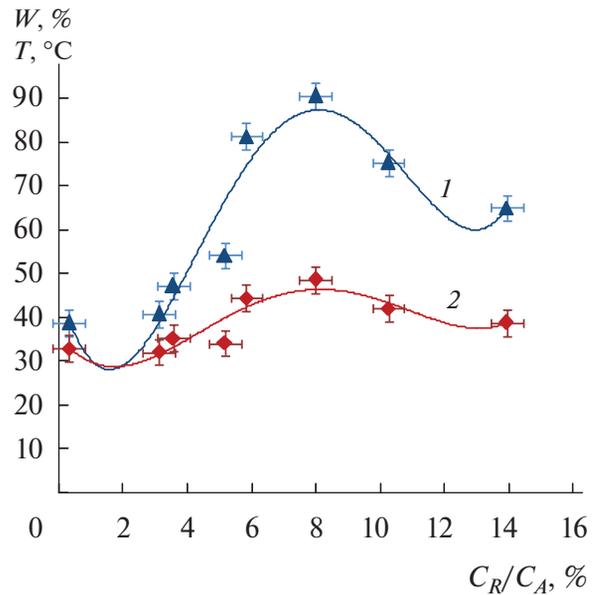


Рис. 2. Зависимости количества отслоившейся воды W (1) и температуры нагрева T (2) для исследуемых эмульсий от соотношения содержаний смол и асфальтенов C_R/C_A .

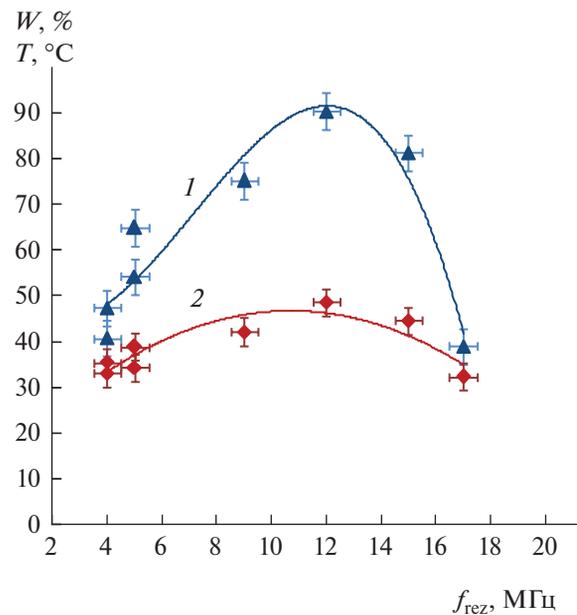


Рис. 3. Зависимости количества отслоившейся воды W (1) и температуры нагрева T (2) для исследуемых эмульсий от резонансной частоты эмульсии $f_{рез}$.

чению тангенса угла наклона кривой диэлектрических потерь. При совпадении резонансной частоты эмульсии с частотой действующего поля (13.56 МГц) достигается наибольший эффект от воздействия полем. Также можно видеть, что правая ветка кривой снижается более круто, чем левая. Известно, что с ростом температуры эмульсии ее резонансная частота смещается в область высоких частот [8], поэтому для эмульсий, резонансная частота которых ниже действующей, эффективность воздействия полем растет в процессе обработки, а для эмульсий с резонансной частотой, превышающей частоту поля, эффективность резко падает.

В работах [9, 10] приведены зависимости тангенса угла наклона кривой диэлектрических потерь $\text{tg}\delta$ от суммарного содержания асфальтенов и смол, а также от соотношения содержаний смол и асфальтенов. Показано, что значения $\text{tg}\delta$ для нефтей увеличиваются с ростом суммарного содержания асфальтенов и смол, а также при соотношении содержаний смол и асфальтенов, равном 8 : 1, значение $\text{tg}\delta$ достигает максимума. Результаты настоящего исследования подтверждают, что при максимальном значении тангенса угла наклона кривой диэлектрических потерь (образец № 4 в таблице) температура эмульсии и объем отслоившейся воды достигают максимумов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проведенных исследований показано, что при воздействии ВЧ электромагнитным полем на водонефтяные эмульсии степень нагрева и эффективность разделения эмульсии зависят от суммарного содержания асфальтенов и смол, их соотношения, попадания рабочей частоты генератора в область резонансных частот эмульсий. С увеличением суммарного содержания асфальтенов и смол в нефти увеличиваются температура нагрева эмульсии и количество отслоившейся воды. Значения температуры эмульсий и количества отслоившейся воды при ВЧ-воздействии проходят через максимум при соотношении содержаний смол и асфальтенов 8 : 1. Наибольший эффект от воздействия полем достигается при совпадении резонансной частоты эмульсии с частотой действующего поля. При всех наблюдаемых эффектах от действия электромагнитного поля количество отслоившейся воды увеличивается сильнее, чем температура эмульсии, что объясняется диэлектрической поляризацией полярных компонентов нефти.

Исследования выполнены при поддержке Российского научного фонда (проект № 19-11-00298).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Денгаев А.В., Вербицкий В.С., Геталов А.Н.* Применение акустических методов разделения водонефтяных эмульсий // Сб. докл. III Региональной науч.-техн. конф. "Губкинский университет в решении вопросов нефтегазовой отрасли России". М., 2019. С. 21.
2. *Лекомцев А.В., Мордвинов В.А., Дворецкас Р.В., Степаненко И.Б., Баканеев В.С., Силичев М.А., Корнилов К.В.* Обоснование технологии ультразвукового воздействия для разрушения стойких водонефтяных эмульсий // Изв. Томск. политех. ун-та. Инжиниринг георесурсов. 2021. Т. 332. № 5. С. 101.
3. *Лесин В.И., Кокшаров Ю.А., Хомутов Г.Б.* Структура совместных агрегатов коллоидных наночастиц нефти и магнитных наночастиц окислов железа // Георесурсы, геознергетика, геополитика. 2010. № 1. С. 29.
4. *Доломатов М.Ю., Телин А.Г., Сафуанова Р.М., Борисов Г.К., Бурханова З.И., Кисмерешкин С.В., Докичев В.А.* Резонансная колебательная деструкция водородных связей как причина метастабильности эмульсий под действием магнитного поля // Электротехнические и информационные комплексы и системы. 2014. Т. 10. № 3. С. 113.
5. *Телин А.Г., Крестелева И.В., Борисов Г.К., Докичев В.А., Свирский В.Э., Кулешов С.П., Алимбекова С.Р.* О влиянии низкочастотного магнитного поля на деэмульсацию стойких водонефтяных эмульсий // Нефть. Газ. Новации. 2013. № 8. С. 68.
6. *Ковалева Л.А., Зиннатуллин Р.Р., Султангузин Р.Ф., Габдрафиков А.Ф., Гайнетдинов Э.Ф., Грехов И.В., Богданов А.В.* Лабораторные исследования фазоразделения водонефтяных эмульсий в высокочастотных и сверхвысокочастотных электромагнитных полях // Нефтегазовое дело. 2020. Т. 18. № 4. С. 80.
7. *Kovaleva L.A., Minnigalimov R.Z., Zinnatullin R.R.* Destruction of Water-in-Oil Emulsions in Radio-frequency and Microwave Electromagnetic Fields // Energy Fuels. 2011. V. 25. № 8. P. 3731.
8. *Ковалева Л.А., Миннигалимов Р.З., Зиннатуллин Р.Р.* К исследованию диэлектрических и реологических характеристик водонефтяных эмульсий // ТВТ. 2008. Т. 44. № 5. С. 792.
9. *Зиннатуллин Р.Р., Ковалева Л.А.* Исследования диэлектрических свойств нефтяных дисперсных систем в зависимости от соотношения асфальтосмолистых веществ // Письма ЖТФ. 2022. Т. 48. № 4. С. 41.
10. *Kovaleva L., Zinnatullin R., Musin A., Gabdrifikov A., Sultanguzhin R., Kireev V.* Influence of Radio-frequency and Microwave Electromagnetic Treatment on Water-in-Oil Emulsion Separation // Colloids Surf., A. 2021. V. 614. P. 126081.