

Разрушение водонефтяных эмульсий электромагнитным излучением в динамическом режиме¹

Ковалева Л.А., Зиннатуллин Р.Р., Благодичиннов В.Н., Мусин А.А., Фатхуллина Ю.И., Замула Ю.С.

Центр «Микро- и наномасштабной динамики дисперсных систем», БашГУ, Уфа

В статье представлены результаты экспериментальных и численных исследований влияния ВЧ и СВЧ электромагнитных полей на водонефтяные эмульсии. Проведено детальное исследование зависимости диэлектрических свойств эмульсий от частоты для возможности установления области частот наиболее эффективного электромагнитного воздействия. Представлены результаты исследований устойчивости водонефтяных эмульсий в ВЧ электромагнитном поле в зависимости от их диэлектрических свойств. Экспериментально исследовано воздействие СВЧ электромагнитного поля на эмульсии в динамическом режиме. Рассмотрена математическая модель влияния ВЧ и СВЧ электромагнитных полей на эмульсионную каплю с целью определения механизма разрушения эмульсии.

1. Введение

Одним из важных технологических процессов в нефтедобыче является промысловая подготовка нефти, в которой основную задачу составляет обезвоживание водонефтяной эмульсии. Другая задача, связанная с проблемой обезвоживания устойчивых водонефтяных эмульсий, — утилизация нефтяных шламов, в огромных количествах накопленных в районах нефтедобычи, трубопроводного транспорта нефти и нефтепродуктов, а также предприятий нефтепереработки и нефтехимии.

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 полей ВЧ и СВЧ диапазонов. Выбор вышеуказанных диапазонов обосновывается тем, что для водонефтяной эмульсии диэлектрические пара-

метры, определяющие степень взаимодействия поля со средой, имеют две области дисперсии в ВЧ и СВЧ областях. Дисперсия в ВЧ области обусловлена поляризацией полярных компонентов нефти (асфальтенов, смол), а в СВЧ области — поляризацией молекул воды [2, 3].

Этот факт дает возможность использования энергии электромагнитного поля ВЧ и СВЧ диапазонов при разработке технологии обезвоживания водонефтяных эмульсий.

Эффективность действия электромагнитного поля определяется частотой приложенного поля и диэлектрическими свойствами (тангенсом угла диэлектрических потерь $\operatorname{tg} \delta$ и относительной диэлектрической проницаемостью ϵ') эмульсии, которые характеризуют его поведение во внешнем поле [2, 4]. Поэтому детальное исследование зависимости диэлектрических свойств эмульсий от частоты поля дает возможность установить область частот наиболее эффективного электромагнитного воздействия. Диэлектрические параметры исследуемых водонефтяных эмульсий определялись методом куметра (ВМ-560, Е4-11). Для исследованных образцов зависимости $\operatorname{tg} \delta(f)$ имеют ярко выраженные резонансные максимумы в диапазоне частот 1–20 МГц (рис. 1).

Наличие максимума в частотном ходе $\operatorname{tg} \delta$ позволяет прогнозировать резонансное взаимодействие объектов с ВЧ ЭМ полем, т.е. при частоте электромагнитного поля, равной частоте, при ко-

¹Работа выполнена при поддержке грантов Министерства образования и науки России (11.G34.31.0040 и МК-3070.2011.8) и гранта РФФИ № 11-01-97013.

торой $\operatorname{tg} \delta$ имеет максимум, энергия поля наиболее интенсивно поглощается полярными компонентами среды, образующими бронирующие оболочки высокомолекулярных полярных компонентов нефти, образующиеся в эмульсии на поверхности капель воды. Следовательно, в ней возникнут интенсивные термо- и гидродинамические эффекты, и прочность молекулярной связи между дипольными молекулами оболочки снизится. Это, в конечном счете, ослабит прочность всей оболочки, что приведет к разрушению водонефтяной эмульсии.

2. Экспериментальные исследования

Для экспериментальных исследований воздействия ВЧ ЭМ поля на образцы использовался лабораторный стенд высокочастотного четвертьволнового резонатора рис. 2. Образцы эмульсий в мерной пробирке по 25 мл помещались в узел обработки эмульсии электромагнитным полем с частотой излучения 13,56 МГц и мощностью излучения 800 Вт. Узел обработки 1 соединяется с генератором электромагнитных волн посредством коаксиального кабеля 3 марки РК-75-44-12 и тройника 4. Согласование системы производится посредством узла согласования 5, представляющего собой коаксиальную систему переменной емкости.

Результаты, полученные после воздействия на исследуемые эмульсии ВЧ ЭМ полем с частотой 13,56 МГц, представлены на рис. 3, из которого видно, что эмульсия, у которой резонансная частота ближе к рабочей частоте ВЧ генератора (13,56 МГц), разрушается наиболее эффективно [5].

При резонансном взаимодействии ЭМ поля со средой происходит интенсивное разрушение структуры бронирующих оболочек на каплях воды, состоящих из адсорбированных на ее поверхности полярных компонентов нефти (асфальтенов, смол и др.).

Кроме этого, для визуализации процесса взаимодействия капель воды в водонефтяных эмульсиях были сделаны видеосъемки процесса воздействия ВЧ электромагнитного поля ($f = 0,5$ МГц, $W = 30$ Вт) на микроструктуру водонефтяных эмульсий. Для этого использовались генератор AG 1021 (T&C Power Conversion) и видеокамера INFINITY 2 (Lumenera). На рис. 4 представлены кадры в отсутствие электромагнитного поля (а) и через 30 секунд после включения электромагнитного генератора (б). Как видно, под действием ВЧ электромагнитного поля образуются агрегаты капель в виде цепочек, вытянутых преимущественно вдоль направления силовых линий электрического поля. Наблюдается также и слияние капель.

Аналогичные исследования проводили в СВЧ

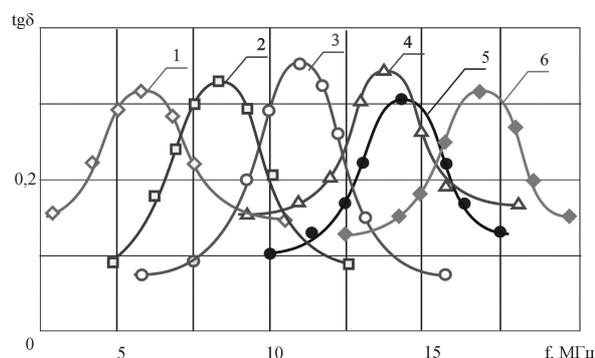


Рис. 1. Зависимость тангенса угла диэлектрических потерь для образцов эмульсий от частоты ЭМП с различным содержанием воды в образцах: 1 — 60%; 2 — 50%; 3 — 40%; 4 — 30%; 5 — 20%; 6 — 10%

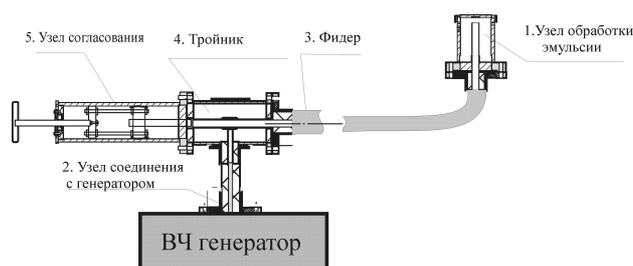


Рис. 2. Принципиальная схема лабораторного стенда для обработки эмульсии ВЧ электромагнитным полем

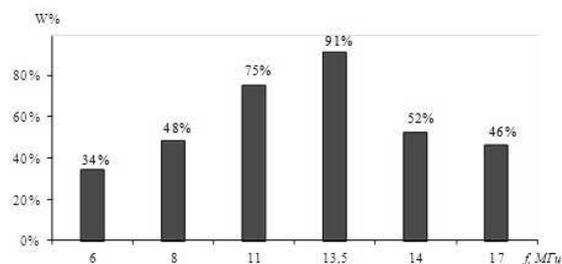


Рис. 3. Зависимость доли отслоившейся воды из водонефтяной эмульсии в зависимости от ее резонансной частоты

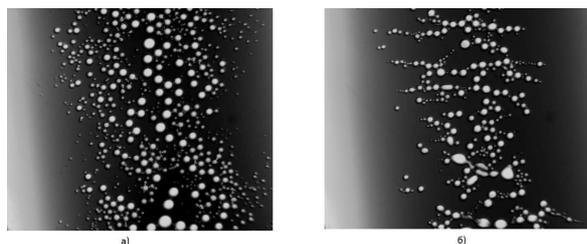


Рис. 4. Фотографии микроструктуры водонефтяной эмульсии до и после воздействия ВЧ ЭМ полем

области с частотой 2,4 ГГц. На рис. 5 представлена принципиальная схема установки для обработки эмульсий СВЧ электромагнитным полем в динамическом режиме.

Результаты исследований воздействия СВЧ электромагнитного поля на различные образцы эмульсий показали, что эффективность расслоения эмульсий в СВЧ ЭМ поле зависит от толщины бронирующей оболочки. При СВЧ электромагнитном воздействии на водонефтяную эмульсию основная энергия поглощается водной фазой, сосредоточенной в глобулах, покрытых бронирующей оболочкой. В результате в глобулах воды возникают объемные источники тепла, за счет чего происходит их интенсивный нагрев, приводящий к разрушению бронирующей оболочки. Однако, в зависимости от прочности и толщины бронирующей оболочки температура, при которой происходит разрыв оболочки, может быть разной. Для разрыва тонких оболочек достаточны небольшие температуры. При значительной прочности и толщине оболочки температура разрыва и давление внутри оболочки могут быть настолько большими, что при разрыве оболочки происходит локальный разрыв и «впрыскивание» глобул воды в нефтяную фазу. В результате образуется мелкодисперсная стойкая среда, что подтверждается фотоснимками микроструктуры водонефтяной эмульсии до и после обработки СВЧ ЭМП (рис. 6) [6].

Для предотвращения локальных разрывов капель дальнейшие исследования проводились в динамическом режиме. На рис. 7 сопоставлены фотографии микроструктуры образца № 3 до обработки, после обработки СВЧ ЭМП в статическом режиме и в динамическом режиме при различных скоростях потока.

До обработки наблюдаем устойчивую водонефтяную эмульсию с диспергированными глобулами воды. После обработки СВЧ ЭМП в статическом режиме наблюдаем отрицательный эффект разрушения тех самых глобул воды, то есть гло-

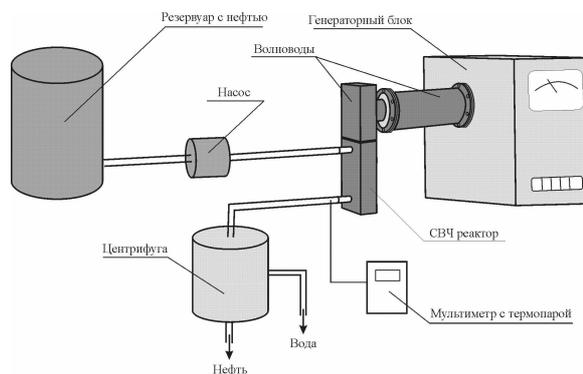


Рис. 5. Принципиальная схема установки для обработки эмульсий СВЧ электромагнитным полем в динамическом режиме

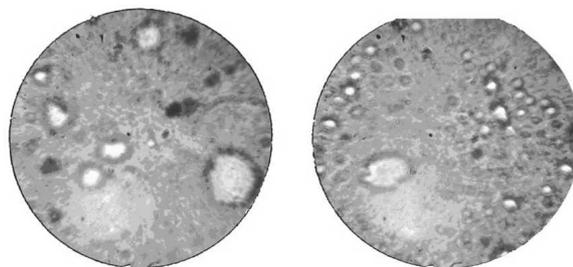


Рис. 6. Фотоснимки микроструктуры образца эмульсии до и после обработки СВЧ ЭМП

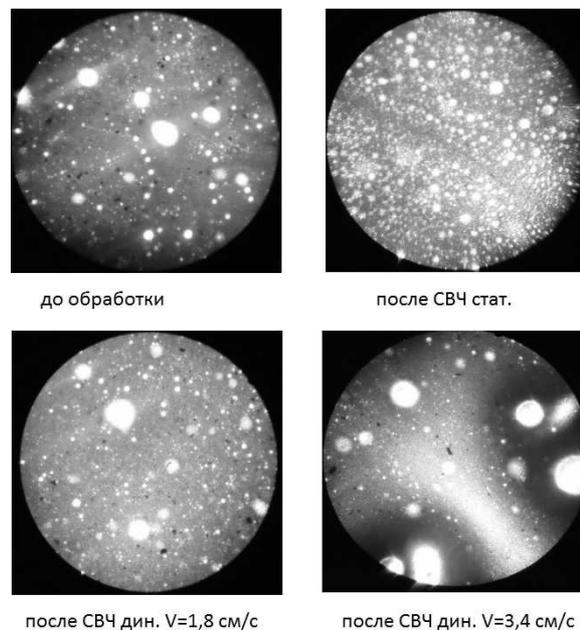


Рис. 7. Фотографии микроструктур образца № 3 до обработки и после обработки СВЧ ЭМП в различных условиях

булы разбились на более мелкие глобулы. Произошел разрыв устойчивой оболочки диспергированных капель вследствие увеличения давления в этих каплях при воздействии СВЧ ЭМП. При обработке СВЧ ЭМП в динамическом режиме при скорости потока 1,8 см/с наблюдается положительный эффект действия поля, то есть мелкодиспергированные глобулы воды слились в более крупные глобулы. После обработки при скорости потока 3,4 см/с наблюдаем усиление эффекта действия поля.

3. Математическое моделирование

Предполагается, что капля воды радиуса r_0 находится в несмешивающейся с ней углеводородной жидкости. На границе фаз действует сила поверхностного натяжения. Кроме того, считается, что в процессе формирования капли на ее поверхности образовалась жесткая бесконечно тонкая бронирующая оболочка. В результате действия электромагнитного поля жидкости нагреваются и начинается тепловая конвекция, причем характер течения будет зависеть от способа теплового воздействия: при ВЧ воздействии преимущественно греется бронирующая оболочка, в случае СВЧ излучения происходит нагрев самой капли. Считается, что капля в процессе воздействия не деформируется и сохраняет сферическую форму. Зависимостью теплофизических свойств жидкостей от температуры пренебрегается. Движение каждой из сред описывается системой уравнений тепловой конвекции в линейном приближении Буссинеска [7]. На границе раздела сред выполняются закон сохранения энергии и условия динамического равновесия. Сила поверхностного натяжения, действующая в узком переходном слое (в бронирующей оболочке), сводится к объемной [8]. Энергия электромагнитного поля расходуется на нагрев среды и моделируется в виде распределенных источников тепла [9]. Тогда безразмерная система уравнений тепловой конвекции запишется в следующем виде:

$$\frac{\partial(\rho\mathbf{U})}{\partial t} + \nabla(\rho\mathbf{U}\mathbf{U}) = -\nabla p + \nabla\tau + \mathbf{n}Gr\theta + \frac{1}{We}\mathbf{F}, \quad (1)$$

$$\nabla\mathbf{U} = 0, \quad (2)$$

$$\frac{\partial T}{\partial t} + (\mathbf{U}\nabla)T = \frac{1}{Pr}\Delta T + \frac{Os}{Pr}q, \quad (3)$$

$$q = \frac{\omega\varepsilon_0\varepsilon' \operatorname{tg} \delta}{2} |E|^2, \quad (4)$$

где Pr — число Прандтля; Gr — число Грасгофа; Os — число Остроградского; We — число Вебера; \mathbf{U} — вектор скорости; $\tau = \mu(\nabla\mathbf{U} + \nabla\mathbf{U}^T)$ — тензор вязких напряжений; ρ — плотность; μ — динамическая вязкость; p — давление; T — температура;

\mathbf{n} — единичный вектор, направленный вдоль вектора ускорения свободного падения; q — плотность распределенных источников тепла.

В силу симметрии системы задача решалась в сферической системе координат (r, φ, θ) с началом в центре капли. Оси системы координат ориентированы параллельно полю и вектору ускорения свободного падения. Таким образом, нет зависимости от координаты φ .

Краевые условия следующие:

$$U_r(r, \theta, 0) = 0; U_\theta(r, \theta, 0) = 0; T(r, \theta, 0) = T_0; \quad (5)$$

$$\frac{\partial U_r(0, \theta, t)}{\partial r} = 0; U_\theta(R, \theta, t) = 0; \quad (6)$$

$$\frac{\partial U_r(r, 0, t)}{\partial \theta} = 0; \frac{\partial U_r(r, \pi, t)}{\partial \theta} = 0; \quad (7)$$

$$\frac{\partial U_\theta(0, \theta, t)}{\partial r} = 0; U_r(R, \theta, t) = 0; \quad (8)$$

$$U_\theta(r, 0, t) = 0; U_\theta(r, \pi, t) = 0; \quad (9)$$

$$\frac{\partial T(0, \theta, t)}{\partial r} = 0; \frac{\partial T(R, \theta, t)}{\partial r} = 0; \quad (10)$$

$$\frac{\partial T(r, 0, t)}{\partial \theta} = 0; \frac{\partial T(r, \pi, t)}{\partial \theta} = 0. \quad (11)$$

Поставленная задача решалась численно методом контрольного объема с использованием алгоритма SIMPLE.

На рис. 8 приведены радиальные распределения температуры в капле в случае ВЧ и СВЧ воздействия. В случае СВЧ нагрева тепловой поток направлен из центра капли (кривая 1), в то время как в случае ВЧ воздействия тепловой поток направлен от поверхности капли к ее центру (кривая 2). Линии тока в капле воды и окружающей жидкости для соответствующих способов воздействия показаны на рис. 9. Ввиду того, что диссипация энергии электромагнитного поля в случае ВЧ и СВЧ нагрева происходит в разных областях, характер теплового движения оказывается различным. А именно, при ВЧ воздействии основной нагрев происходит на границе раздела фаз, т.е. греется бронирующая оболочка (кривая 2 на рис. 8). Поэтому нагретая у границы бронирующей оболочки жидкость внутри и вне капли устремляется вверх вдоль границы раздела сред (рис. 9(а)). Происходит сонправленное обтекание бронирующей оболочки капли. Течение внутри капли на рис. 1(а) направлено против часовой стрелки.

В случае СВЧ воздействия диссипация энергии поля происходит непосредственно в самой капле. Температура в центре капли оказывается максимальной (кривая 1 на рис. 8). Возникающая при

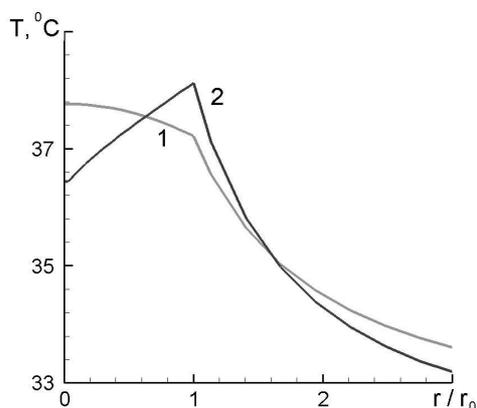


Рис. 8. Радиальное распределение температуры внутри и вне капли воды для СВЧ (кривая 1) и ВЧ (кривая 2) электромагнитного нагрева

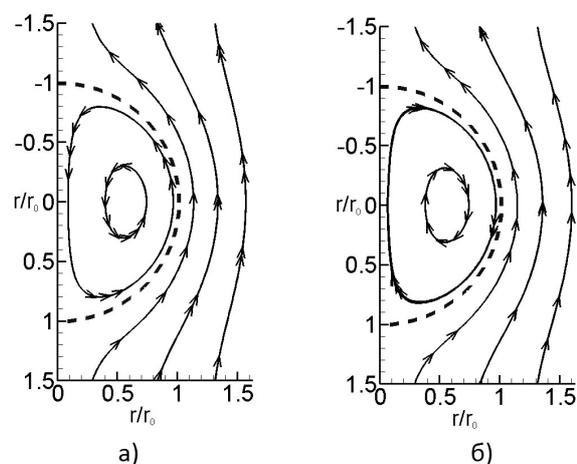


Рис. 9. Линии тока в капле и окружающей жидкости при ВЧ (а) и СВЧ (б) нагреве капли

этом конвективная структура отличается от описанной выше. Нагретая в центре капли жидкость поднимается вверх и опускается вниз вдоль границы капли. Течение внутри капли в этом случае направлено по часовой стрелке (рис. 9(б)). Конвекция в окружающей жидкости не отличается от конвекции в случае ВЧ воздействия на каплю и направлено вверх вдоль границы раздела сред. Таким образом, на границе раздела сред происходит противоположное обтекание бронирующей оболочки капли. Различие характера конвективных течений в случае ВЧ и СВЧ нагрева капли приведет к различию термоупругих напряжений на границе раздела сред.

4. Заключение

Полученные результаты показывают, что расслоение водонефтяных эмульсий происходит эффективнее при ВЧ электромагнитном воздействии в случае нахождения частоты воздействия в ВЧ области дисперсии диэлектрических параметров объекта, в противном случае наиболее эффективным является воздействие СВЧ электромагнитным полем. Однако, при воздействии на объекты СВЧ электромагнитным полем эффект зависит от толщины бронирующей оболочки вокруг глобул воды, при определенной толщине оболочки наблюдается распыливание глобул воды.

Результаты расчетов показали, что действие ВЧ и СВЧ электромагнитного излучения отличается не только распространением температуры, но и структурой возникающих конвективных течений. Под действием ВЧ излучения происходит сонаправ-

ленное обтекание бронирующей оболочки капли. В случае СВЧ воздействия обтекание бронирующей оболочки капли происходит в противоположных направлениях.

При воздействии на исследуемые образцы СВЧ электромагнитным полем в динамическом режиме в отличие от статического режима наблюдается увеличение размера капель воды и их слияние. Эффективность действия СВЧ ЭМ поля в динамическом режиме зависит от скорости потока.

Список литературы

- [1] Тронов В.П. Разрушение эмульсии при добыче нефти. М: Недра, 1974. 271 с.
- [2] Саяхов Ф.Л., Ковалева Л.А., Галимбеков А.Д. Электрофизика нефтегазовых систем. Уфа: БашГУ, 2003. 188 с.
- [3] Ковалева Л.А., Миннигалимов Р.З., Зиннатуллин Р.Р. К исследованию диэлектрических и реологических характеристик водонефтяных эмульсий // Теплофизика высоких температур. 2008. Т. 46, № 5. С. 792–795.
- [4] Ковалева Л.А., Миннигалимов Р.З., Зиннатуллин Р.Р. Развитие электромагнитной технологии для утилизации нефтешлама // Нефтяное хозяйство. 2009. № 9. С. 48–51.
- [5] Ковалева Л.А., Зиннатуллин Р.Р. Исследование устойчивости водонефтяной эмульсии в электромагнитном поле в зависимости от ее диэлектрических свойств // Изв. вузов. Нефть и газ. 2010. № 2. С. 59–63.

- [6] Kovaleva L., Zinnatullin R., Minnigalimov R. Dehydrating of Heavy Crude Oil Using Radio-Frequency and Microwave Radiation: What is Better? // Petroleum Phase Behavior and Fouling. Proc. 11th Annual International Conference. New York, 2010. № 031.
- [7] Boussinesq J. Theorie analytique de la chaleur. Vol. 2, Gauthier-Villars, Paris. 1903.
- [8] Brackbill J.U., Kothe D.B., Zemach C.A. A continuum method for modelling surface tension // J. Comp. Physics. 1992. Vol. 100, № 2. P. 335–354.
- [9] Kovaleva L., Musin A., Zinnatullin R., Akhatov I.S. Destruction of water-in-oil emulsions in electromagnetic fields // Proceedings of ASME 2011 International Mechanical Engineering Congress & Exposition, IMECE2011-62935, Denver, Colorado, USA, November 11–17, 2011.