

## ПРИМЕНЕНИЕ ВЧ И СВЧ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ ПРИ ПОДГОТОВКЕ НЕФТИ И ПЕРЕРАБОТКЕ НЕФТЯНЫХ ШЛАМОВ

Л.А. Ковалева, Р.Р. Зиннатуллин,  
А.А. Мусин, Ю.И. Фатхуллина  
Башкирский государственный университет, Уфа

Одними из важных технологических процессов в нефтедобыче являются обезвоживание водонефтяной эмульсии и связанная с ним 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 параметры, 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  $\epsilon'$ ) 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.

На рис. 1 представлена принципиальная гидравлическая схема установки высокочастотной диэлектрической спектрометрии (УВДС), обеспечивающей измерение диэлектрических характеристик жидкостей и высоковязких компаундов в диапазоне частот 50 кГц–300 МГц.

Основной измерительной частью установки является измеритель добротности, к которому подключается измерительный конденсатор. Конденсатор помещается внутрь автоклава, где обеспечиваются задаваемые температура и давление. Также в схему входит термостат, устройство давления с манометром. Автоклав оснащен термостатирующей рубашкой и позволяет проводить температурные исследования в широком интервале. Заданная температура обеспечивается циркуляцией термостатирующей жидкости в системе «термостат – терморубашка» измерительного конденсатора. Заданное давление создается и поддерживается с помощью измерительного пресси. Давление нефти контролируется манометром.

Для экспериментальных исследований воздействия ВЧ ЭМ поля на образцы использовался лабораторный стенд высокочастотного четвертьволнового резонатора (рис. 2). Образцы эмульсий в мерных пробирках 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.

Аналогичные исследования проводили в СВЧ области с частотой 2,4 ГГц. На рис. 3 представлена принципиальная схема установки для обработки эмульсий СВЧ электромагнитным полем в поточном режиме.

Исследованию подвергались водонефтяные эмульсии различного состава. Для исследованных образцов зависимости  $\text{tg}\delta(f)$  имеют ярко выраженные резонансные максимумы в диапазоне частот 1–20 МГц (рис. 4). Наличие максимума в частотном ходе  $\text{tg}\delta$  позволяет прогнозировать резонансное взаимодействие объектов с ВЧ ЭМ полем, т.е. при частоте электромагнитного поля, равной частоте, при которой  $\text{tg}\delta$  имеет максимум, энергия поля наиболее интенсивно поглощается полярными компонентами среды, образующими бронирующие оболочки высокомолекулярных полярных компонентов нефти, возникающие 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.

Для определения степени разрушения эмульсии в ВЧ ЭМ поле в зависимости от диэлектрических свойств эмульсии дальнейшие исследования проводились с эмульсиями,

для которых частоты, соответствующие максимумам  $\text{tg}\delta$ , с различной степенью приближены к рабочей частоте генератора, равной 13,56 МГц. Результаты, полученные после воздействия на исследуемые эмульсии ВЧ ЭМ полем с частотой 13,56 МГц, представлены на рис. 5, 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 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.). На рис. 6 приведены фотографии нефтяного шлама до и после воздействия ВЧ ЭМ поля. Из фотографии видно, что нефтешлам имеет дисперсное строение, состоящее из глобул воды и мелких механических примесей (почвы, глины). После воздействия ВЧ ЭМ поля наблюдается укрупнение дисперсных составляющих водяной фракции, а после отстаивания – полное отслоение воды.

Экспериментальные и теоретические исследования взаимодействия ВЧ ЭМ поля со средами нефтяной технологии показали, что его главным отличием от других тепловых методов является появление, кроме чисто теплового воздействия, разрушающих «нетепловых» сил, которые проявляются на микро- и наноуровне.

Далее в работе исследовалось влияние СВЧ электромагнитного поля на устойчивость эмульсии. 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 значительных прочности и толщине оболочки температура разрыва и давление внутри оболочки могут быть настолько высокими, что при разрыве оболочки происходит локальный разрыв оболочки и происходит «впрыскивание» глобул воды в нефтяную фазу. В результате образуется мелкодисперсная стойкая среда, что подтверждается

фотоснимками микроструктуры водонефтяной эмульсии до и после обработки СВЧ ЭМ поля (рис. 7) [6].

Для определения механизма воздействия СВЧ ЭМ поля на эмульсию решалась задача установления степени воздействия СВЧ поля на отдельную эмульсионную каплю. Такой подход возможен при объёмной концентрации капель воды в эмульсии менее 1%, когда капли не взаимодействуют как диполи [7]. При исследовании теплового воздействия ЭМ поля на глобулу воды, окружённую углеводородной жидкостью, решается система уравнений теплопроводности в областях воды и нефти в сферической системе координат  $(r, \theta, \varphi)$ , где  $\theta$  и  $\varphi$  – зенитный и азимутальный углы соответственно. Ввиду малости толщины бронирующей оболочки  $\Delta \ll r_0$  ( $r_0$  – радиус капли) поляризационными процессами, происходящими в ней, можно пренебречь.

Эмульсионная капля находится во внешнем однородном СВЧ ЭМ поле. Центр капли принимается за центр системы координат. Ось вращения капли ориентирована параллельно полю [8], поэтому зависимости от координаты  $\varphi$  нет. Наблюдается симметрия относительно углов  $\theta = 0$  и  $\pi/2$ , т.е. капля состоит из 4 одинаковых квадрантов. Поэтому при решении задачи можно рассматривать только 1-й квадрант, например область от  $\theta = 0$  до  $\pi/2$ .

С учетом принятых допущений решаемая задача запишется в виде следующей системы уравнений теплопроводности:

$$\frac{\partial T_i}{\partial t} = \frac{1}{r^2 c_i \rho_i} \frac{\partial}{\partial r} \left( \lambda_i r^2 \frac{\partial T_i}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2 \sin \theta \cdot c_i \rho_i} \frac{\partial}{\partial \theta} \left( \lambda_i \sin \theta \frac{\partial T_i}{\partial \theta} \right) - U_{ir} \frac{\partial T_i}{\partial r} - \frac{U_{i\theta}}{r} \frac{\partial T_i}{\partial \theta} + \frac{q_i}{c_i \rho_i}, \quad i=1,2 \quad (1)$$

Здесь и далее  $i$  – индексы 1 и 2 относятся к воде и нефти соответственно;  $\lambda$ ,  $c$ ,  $\rho$  – теплопроводность, удельная теплоёмкость и плотность среды соответственно;  $T$  – температура области;  $U_r$  и  $U_\theta$  – компоненты вектора скорости движения жидкостей внутри и вне капли (воды и нефти), вызываемые тензором электрических напряжений,  $q$  – тепловые источники.

Распределение тепловых источников определяется из решения электродинамической задачи. Выражение для него имеет вид [9]:

$$q_i^{(e)} = \frac{\omega \varepsilon_0 \varepsilon_i' \operatorname{tg} \delta_i}{2} |E_i|^2,$$

Здесь  $E$  – вектор напряженности электрического поля;  $\varepsilon_0$  – электрическая постоянная;  $\omega$  – круговая частота ЭМ поля.

Начальные и граничные условия определяются с учетом кондуктивного теплообмена между каплей и окружающей средой:

$$T_1(r, \theta, 0) = T_2(r, \theta, 0) = T_0 = \text{const} , \quad (2)$$

$$\lambda_1 \frac{\partial T_1(r_0, \theta, t)}{\partial r} = \lambda_2 \frac{\partial T_2(r_0, \theta, t)}{\partial r} , \quad (3)$$

$$T_1(r_0, \theta, t) = T_2(r_0, \theta, t) , \quad (4)$$

$$\frac{\partial T_1(0, \theta, t)}{\partial r} = 0 , \quad T_2(l, \theta, t) = T_0 , \quad (5)$$

$$\frac{\partial T_1(r, 0, t)}{\partial \theta} = 0 , \quad \frac{\partial T_2(r, \frac{\pi}{2}, t)}{\partial \theta} = 0 . \quad (6)$$

Здесь  $l$  – граница области теплового воздействия.

Система уравнений (1) с краевыми условиями (2)–(6) решалась конечно-разностным методом по неявной схеме. В результате вычислений были определены температурные поля внутри эмульсионной капли и вне ее. При расчетах использовались следующие параметры среды:  $\rho_2 = 848 \text{ кг/м}^3$ ;  $\rho_1 = 1000 \text{ кг/м}^3$ ;  $\lambda_1 = 0,582 \text{ Вт/м}\cdot\text{К}$ ;  $\lambda_2 = 0,118 \text{ Вт/м}\cdot\text{К}$ ;  $r_0 = 5,5 \cdot 10^{-5} \text{ м}$ ;  $T_0 = 20 \text{ }^\circ\text{C}$ ;  $\text{tg}\delta_1 = 0,134$ ;  $\eta_1 = 0,001 \text{ Па}\cdot\text{с}$ ;  $\eta_2 = 0,01 \text{ Па}\cdot\text{с}$ ;  $\varepsilon'_1 = 78,2$ ;  $\varepsilon'_2 = 2,28$ ;  $f = 2,4 \text{ ГГц}$ ;  $E_0 = 2 \cdot 10^5 \text{ В/м}$ ;  $c_2 = 1885 \text{ Дж/кг}\cdot\text{К}$ ;  $c_1 = 4190 \text{ Дж/кг}\cdot\text{К}$ .

На рис. 8, 9 приведено распределение температуры внутри и вне капли воды в различные моменты времени при различных углах  $\theta$ . Из рисунков видно, что капля нагревается неравномерно по всему объему. Максимальная температура в центре капли за 0,9 с достигает  $32,95 \text{ }^\circ\text{C}$ , а на поверхности капли варьируется от  $30,79$  до  $31,74 \text{ }^\circ\text{C}$  в зависимости от угла  $\theta$ . При этом температурная разница между центром и поверхностью капли для  $\theta = 0^\circ$  составляет  $2,16 \text{ }^\circ\text{C}$ , а для  $\theta = 90^\circ$  –  $1,21 \text{ }^\circ\text{C}$ . Можно также отметить, что при  $\theta = 90^\circ$  наблюдается более плавное снижение температуры за пределами капли, чем при  $\theta = 0^\circ$ , где снижение температуры происходит более резко. Это можно объяснить более интенсивным теплопереносом за счет возникающих градиентов температуры, а также конвективных течений, зависящих от напряженности электрического поля.

Для предотвращения локальных разрывов капель дальнейшие исследования проводились в динамическом режиме. На рис. 10 сопоставлены фотографии микроструктуры образца № 3 до обработки, после обработки СВЧ ЭМ поля в статическом режиме и в динамическом режиме при различных скоростях потока. До обработки наблюдаем устойчи-

вую водонефтяную эмульсию, с диспергированными глобулами воды. После обработки СВЧ ЭМ поля в статическом режиме наблюдаем отрицательный эффект разрушения тех самых глобул воды, то есть глобулы разбились на более мелкие глобулы. Произошел разрыв устойчивой оболочки диспергированных капель вследствие увеличения давления в этих каплях при воздействии СВЧ ЭМ поля. При обработке СВЧ ЭМ поля 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.

### 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 распыскивание глобул воды.

Сформулированная двумерная задача показала, что при учете конвективного переноса тепла происходит неравномерный разогрев капли, преимущественно вдоль направления линий напряженности поля, что может привести к неравномерному разрушению бронирующей оболочки, то есть к ее опережающему разрыву на полюсах капли.

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. При увеличении скорости потока увеличивается эффективность действия поля.

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

## ЛИТЕРАТУРА

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 // Нефт. хоз-во. 2009. № 9. С. 48–51.
5. *Ковалева Л.А., Зиннатуллин Р.Р.* Исследование устойчивости водонефтяной эмульсии в электромагнитном поле в зависимости от её 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. N. Y., 2010. N 031.
7. *Панченков Г.М.* Поведение эмульсии во внешнем электрическом поле / Г.М. Панченков, Л.К. Цабек. М.: Химия, 1969.
8. *Торза С., Кокс Р., Мейсон С.* Электродинамическая деформация и разрыв капель // Реология суспензий. М., 1975. С. 285–333.
9. *Ганиева З.К., Саяхов Ф.Л.* Исследование температурного поля на поверхности эмульсионной капли в высокочастотном электромагнитном поле методом вычислительного эксперимента // Численные методы в прикладной математике: Сб. ст. Уфа, 1986. С. 68–77.

## ПРИЛОЖЕНИЕ

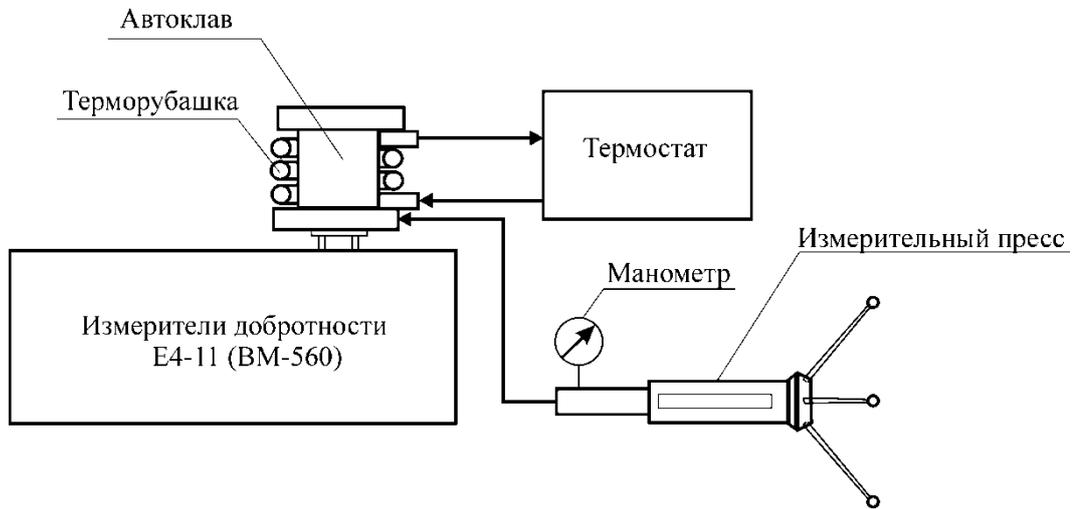


Рис. 1. Принципиальная гидравлическая схема для моделирования различных термобарических условий

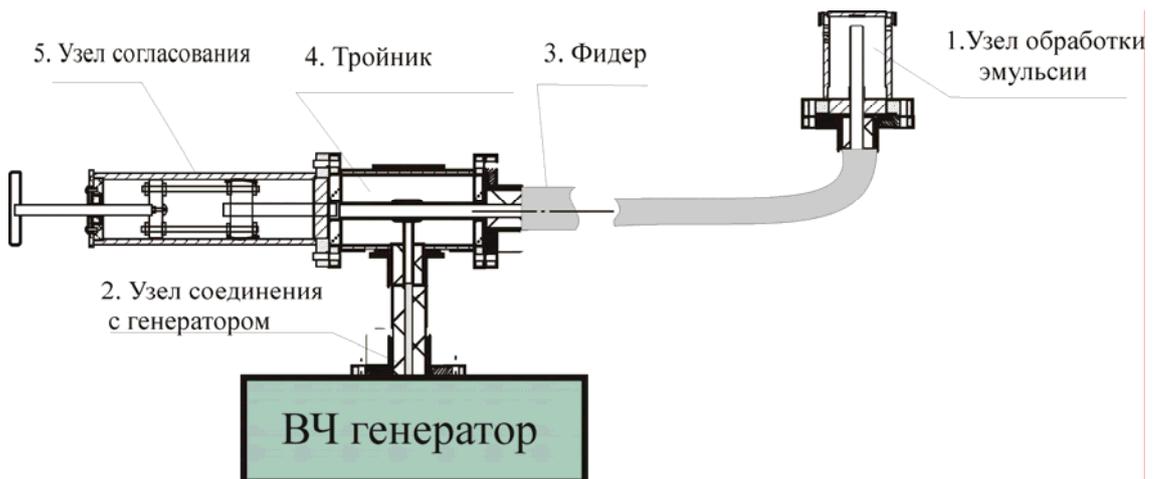


Рис. 2. Принципиальная схема лабораторного стенда для обработки эмульсии ВЧ электромагнитным полем

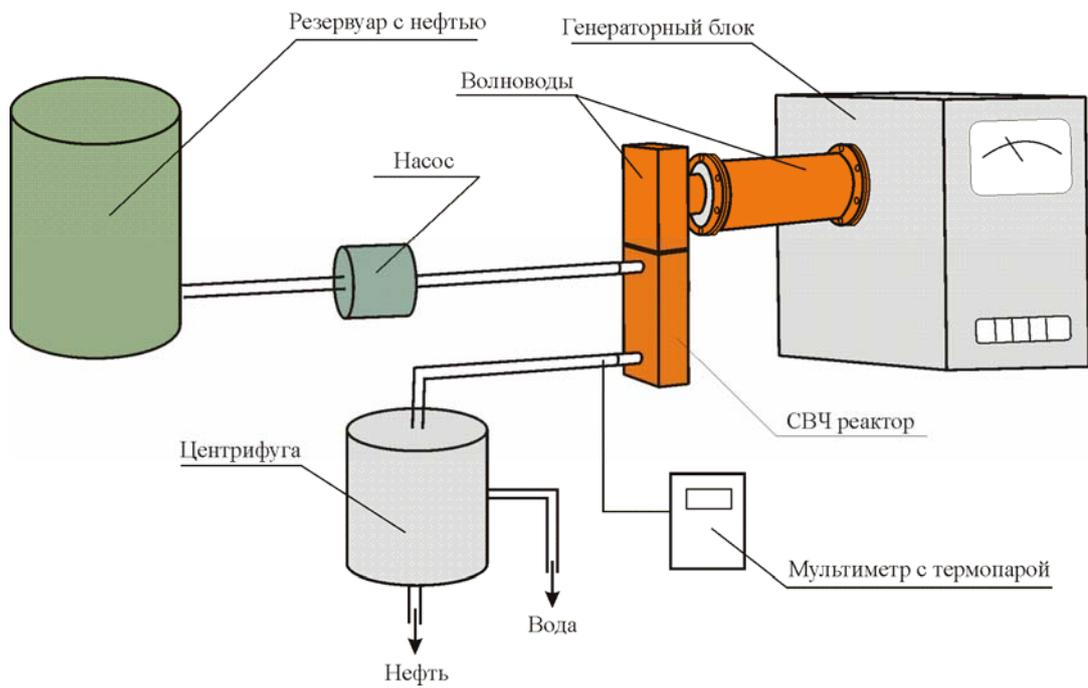


Рис. 3. Принципиальная схема установки для обработки эмульсий СВЧ электромагнитным полем в поточном режиме

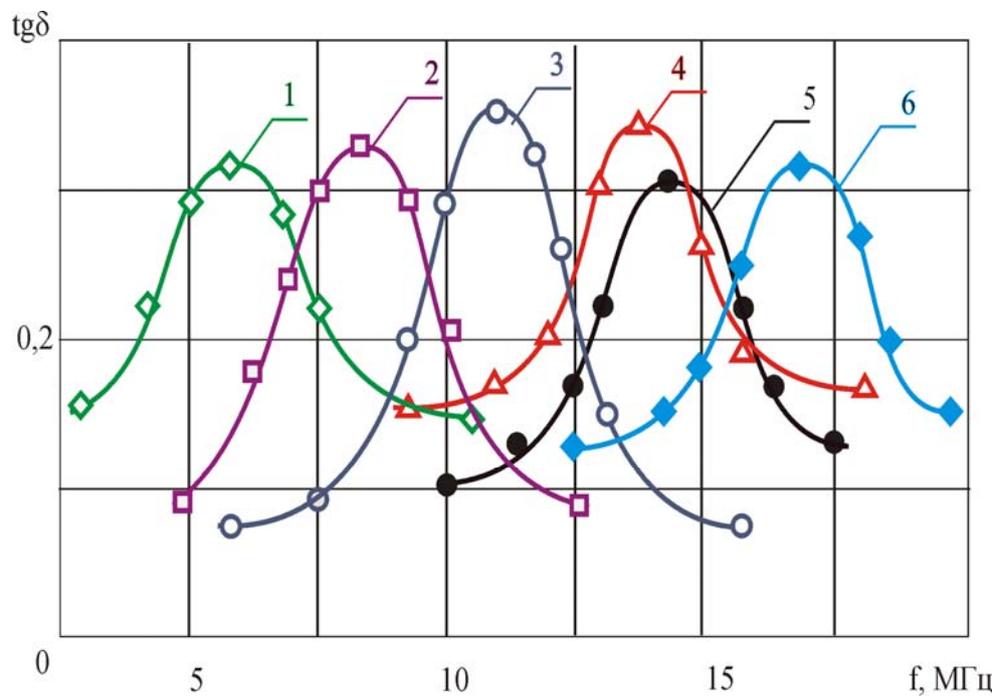


Рис. 4. Зависимость тангенса угла диэлектрических потерь для образцов эмульсий от частоты ЭМП с различным содержанием воды в образцах: 1 – 60%; 2 – 50%; 3 – 40%; 4 – 30%; 5 – 20%; 6 – 10%

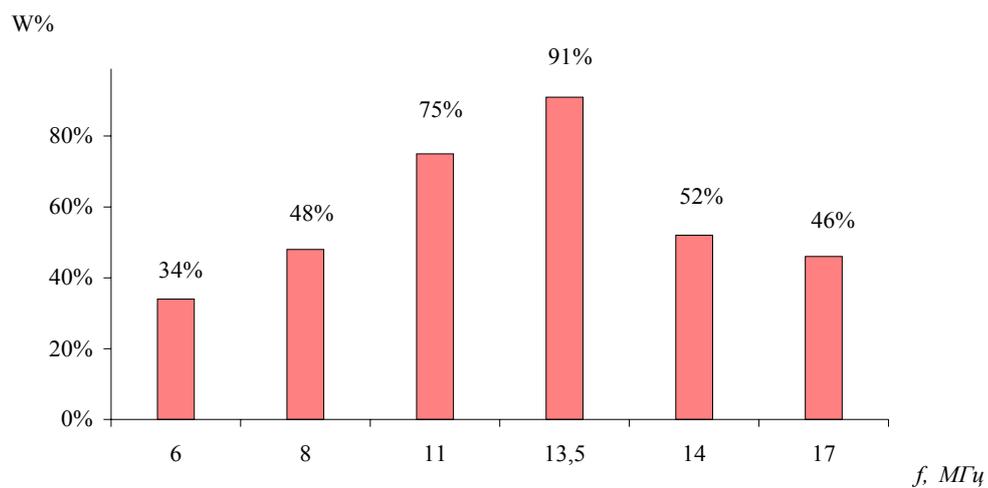


Рис. 5. Зависимость доли отслоившейся воды из водонефтяной эмульсии от её резонансной частоты

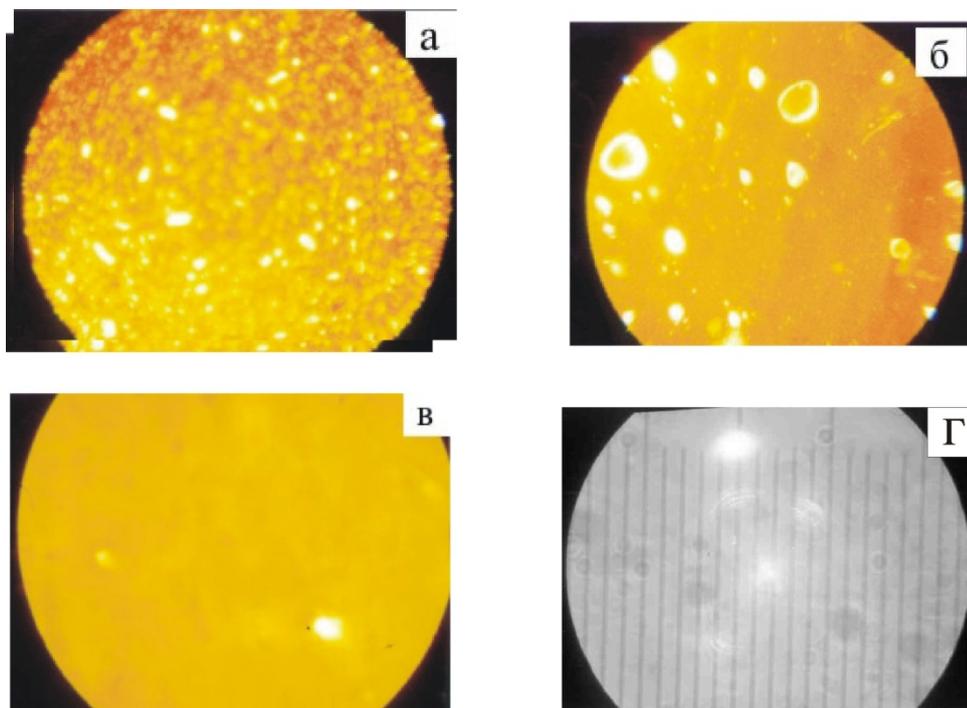


Рис. 6. Фотография микроструктуры нефтяного шлама до (а) и после (б) обработки ВЧ ЭМ полем, в – после обработки ВЧ ЭМ полем и 30-минутного отстаивания, г – шкала микрометра (цена деления 10 мкм, ширина экрана 0,22 мм)

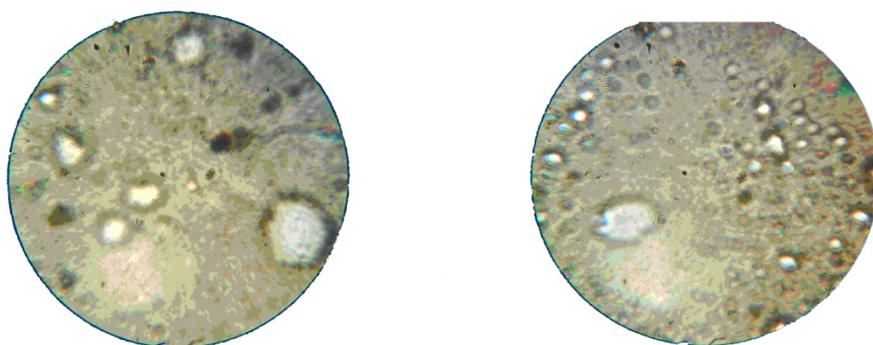


Рис. 7. Фотоснимки микроструктуры образца эмульсии до и после обработки СВЧ ЭМ поля

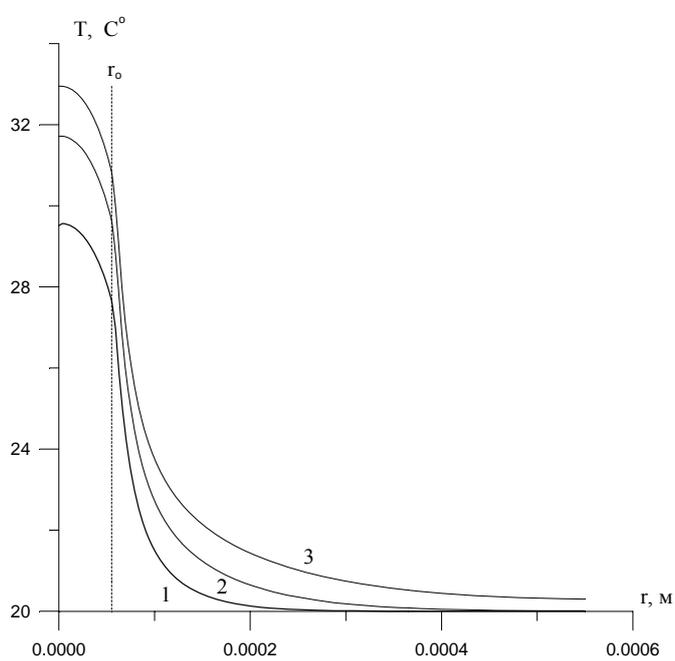


Рис. 8. Распределение температуры в капле воды и вокруг нее в различные моменты времени при  $\theta=0^\circ$ : 1 –  $t = 0,1$  с; 2 –  $t = 0,3$  с; 3 –  $t = 0,9$  с

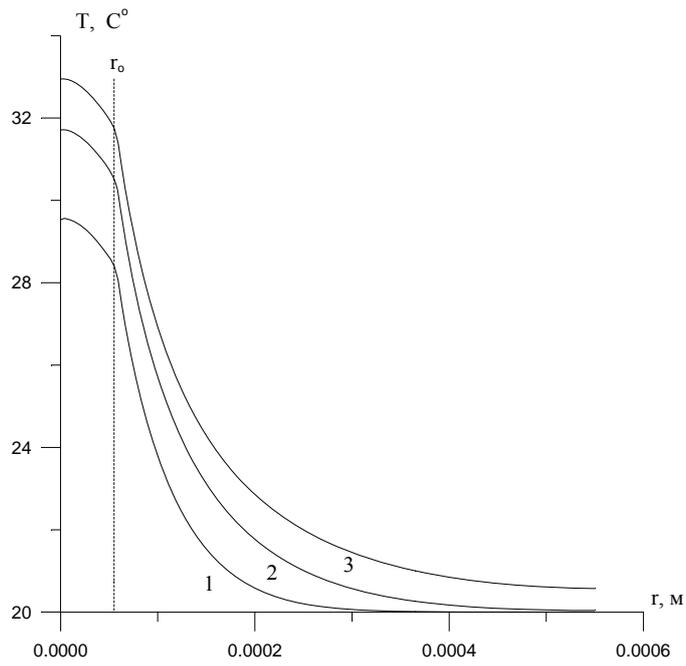
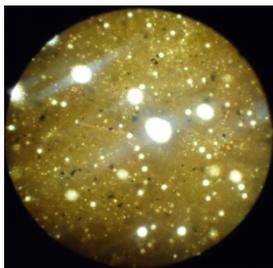
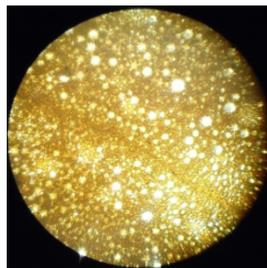


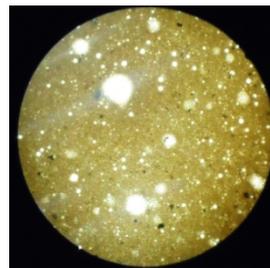
Рис. 9. Распределение температуры в капле воды и вокруг нее в различные моменты времени при  $\theta=90^\circ$ : 1 –  $t = 0,1$  с; 2 –  $t = 0,3$  с; 3 –  $t = 0,9$  с



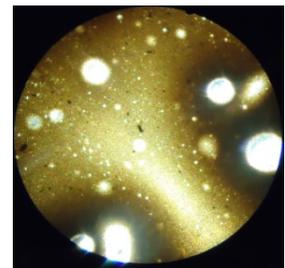
до обработки



после СВЧ стат.



после СВЧ дин.  
 $V = 1.8$  см/с



после СВЧ дин.  
 $V = 3.4$  см/с

Рис. 10. Фотографии микроструктур образца № 3 до и после обработки СВЧ ЭМ поля в различных условиях