

УДК 537.868.3

ИССЛЕДОВАНИЕ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ВОДОНЕФТЕНАСЫЩЕННЫХ ГОРНЫХ ПОРОД И ИХ НАГРЕВА В ЭЛЕКТРОМАГНИТНОМ ПОЛЕ

© 2019 г. Р. Р. Зиннатуллин¹, *, Л. А. Ковалева¹, Р. Ф. Султангужин¹

¹Башкирский государственный университет, г. Уфа, Башкортостан, Россия

*E-mail: rasulz@yandex.ru

Поступило в редакцию 09.02.2018 г.

После доработки 18.05.2018 г.

Принято к печати 10.10.2018 г.

Исследуются диэлектрические свойства водонефтенасыщенных горных пород при различных соотношениях нефти и воды в поровом пространстве и особенности их нагрева в высокочастотном электромагнитном поле. Описаны методы экспериментальных исследований. Рассмотрены особенности диэлектрических свойств горных пород при насыщении смесью нефти и воды в различных соотношениях. Приведены результаты экспериментальных исследований нагрева образцов горных пород, насыщенных смесью нефти и воды в различных соотношениях.

DOI: 10.1134/S0040364419010253

ВВЕДЕНИЕ

Метод нагрева призабойной зоны нефтяного пласта с использованием энергии высокочастотного электромагнитного поля представляется эффективным и перспективным. Основная цель использования электромагнитного поля, как и традиционных термических методов, — нагрев пласта для снижения вязкости нефти. Температура среды повышается за счет поляризационных эффектов в переменном электромагнитном поле. Для электромагнитного нагрева пласта можно использовать широкий спектр частот, но оптимальная частота воздействия выбирается для каждого нефтяного пласта на основе результатов экспериментального и численного моделирования, исходя из коллекторских и физико-химических свойств насыщающей его углеводородной жидкости. При этом глубина проникновения высокочастотной электромагнитной волны в пористую среду может достигать нескольких десятков метров [1].

В работе [2] описываются результаты экспериментальных исследований нагрева нефтенасыщенных горных пород электромагнитным полем. Объектами исследования являлись образцы горной породы, насыщенные смесью нефти и воды в соотношении 75 : 25 (%) соответственно. Были определены диэлектрические параметры (относительная диэлектрическая проницаемость ϵ' и тангенс угла диэлектрических потерь $\text{tg}\delta$) объектов исследования при фиксированной частоте, равной рабочей частоте генератора электромагнитных колебаний (13.56 МГц). Диэлектрические параметры среды имеют большое значение при электромагнитных методах нагрева, так как

именно они определяют степень взаимодействия электромагнитного поля со средой. Физическая сущность электромагнитного метода нагрева нефтяных систем (нефти, водонефтяные эмульсии, водонефтенасыщенные горные породы) заключается в том, что при воздействии электромагнитным излучением частотой из области диэлектрической поляризации полярных агрегатов нефти (асфальтены, смолы и их соединения) в системе происходит диссипация энергии электромагнитного поля, вызванная ориентационной поляризацией [3]. Для таких гетерогенных сред, как водонефтенасыщенная горная порода, основным механизмом поляризации выступает межфазная поляризация, связанная с образованием на границе раздела фаз двойного электрического слоя [4].

В зависимости от процентного содержания воды и нефти в поровом пространстве горной породы, а также от термобарических условий могут возникать различные условия образования двойного электрического слоя, следовательно, и диэлектрические параметры среды будут различны.

Поэтому актуальной задачей при разработке электромагнитных методов воздействия на водонефтенасыщенные горные породы является исследование диэлектрических свойств водонефтенасыщенных горных пород при насыщении их смесью нефти и воды в различных соотношениях, а также особенностей их нагрева в высокочастотных электромагнитных полях.

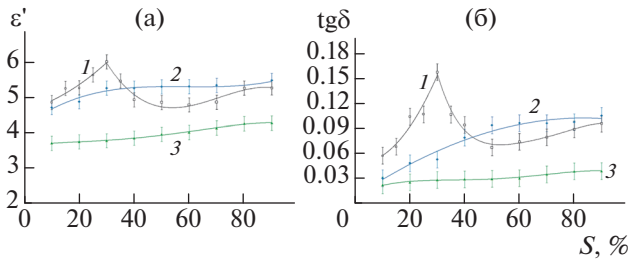


Рис. 1. Зависимости ϵ' (а) и $\operatorname{tg}\delta$ (б) от содержания воды в поровом пространстве образца: 1 – нефть + вода, 2 – вода, 3 – нефть.

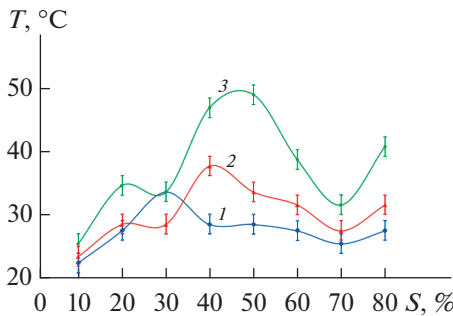


Рис. 2. Изменение температуры в водонефтенасыщенной модели пласта на расстоянии 7 см от излучателя в зависимости от содержания воды в поровом пространстве после нагрева в течение: 1 – 5 мин, 2 – 10, 3 – 20.

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ

В качестве объектов исследования были использованы водонефтенасыщенные насыпные модели на основе кварцевого песка. Образцы отличались соотношением воды и нефти в поровом пространстве. Для приготовления исследуемых образцов был определен объем порового пространства насыпной модели, т.е. объем флюида, необходимого для полного насыщения горной породы. Содержание воды в поровом пространстве менялось от 10 до 90%, остальная часть порового пространства наполнялась нефтью. После насыщения нефтью и водой в заданных пропорциях образец выдерживался сутки для лучшей пропитки песка жидкостью. В результате достигалось равномерное распределение насыщенности по объему образца и выполнялось условие адсорбционного равновесия [5].

Исследования проводились в два этапа. На первом этапе определялись частотные зависимости ϵ' и $\operatorname{tg}\delta$ исследуемых образцов горных пород при различных условиях насыщенности. Измерения осуществлялись на измерителе добротности ВМ-560 (диапазон частот 50 кГц–35 МГц) при температуре 22°C [6].

На втором этапе исследовались особенности нагрева модели пласта при воздействии высокочастотным электромагнитным полем. Модель пласта представляла собой теплоизолированную цилиндрическую емкость диаметром 20 см и вы-

сотой 15 см, наполненную водонефтенасыщенным кварцевым песком. В центре модели размещалась радиопрозрачная трубка диаметром 2 см, внутри которой помещался электромагнитный излучатель. Излучатель через радиочастотный кабель соединялся с высокочастотным генератором с рабочей частотой 13.56 МГц и выходной мощностью 1 кВт. Распределение температуры в образце определялось с помощью системы термопар.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Результаты исследований диэлектрических свойств исследуемых объектов показали, что частотные зависимости ϵ' и $\operatorname{tg}\delta$ имеют характерный вид с дисперсией в диапазоне частот 12.5–14.5 МГц. Частотные зависимости ϵ' и $\operatorname{tg}\delta$ для каждого исследуемого образца идентичны с типичными ϵ' и $\operatorname{tg}\delta$ для нефтенасыщенных горных пород [7, 8]. Область дисперсии ϵ' и $\operatorname{tg}\delta$ с ростом содержания воды в поровом пространстве образца не меняется. Однако наблюдается нелинейная зависимость диэлектрических параметров от содержания воды в поровом пространстве водонефтенасыщенных образцов горной породы.

На рис. 1 представлены зависимости диэлектрических параметров от содержания воды в поровом пространстве при полном наполнении порового пространства нефтью и водой (кривые 1), от водонасыщенности при насыщении водой (2), от нефтенасыщенности при насыщении нефтью (3). При насыщении образцов только нефтью или только водой остальную часть порового пространства занимает воздух (кривые 2 и 3).

Из рис. 1 (кривые 1) видно, что с ростом содержания воды в поровом пространстве до 30% значения ϵ' и $\operatorname{tg}\delta$ увеличиваются и, достигнув максимальных значений при 30%, снижаются. Следует отметить, что такой вид кривых характерен только в присутствии нефти и воды в поровом пространстве. При насыщении пород только водой или только нефтью кривые имеют вид, представленный на рис. 1 (кривые 2 и 3). Аналогичные результаты были получены в работах [9, 10].

Такое поведение диэлектрических параметров является результатом межфазной поляризации [4]. При насыщении водой поверхность частиц горной породы покрывается слоем воды, так как кварц является гидрофильным. На границе воды и нефти образуется двойной электрический слой между адсорбируемыми молекулами асфальтосмолистых соединений, имеющих достаточно высокую проводимость, и ионами воды. При содержании воды 30% в поровом пространстве для водонефтенасыщенных образцов на границе нефти и воды образуется устойчивый двойной электрический слой, обеспечивающий максимальные диэлектрические потери в породе [4].

Далее исследовались особенности нагрева водонефтенасыщенных образцов при воздействии

электромагнитным полем частотой 13.56 МГц. На рис. 2 представлены значения температуры в модели пласта на расстоянии 7 см от излучателя в зависимости от содержания воды.

Наибольшая интенсивность нагрева в течение первых 5 мин достигается при соотношении воды и нефти в поровом пространстве, равном 30 : 70 (%), что соответствует максимальным значениям диэлектрических параметров среды при этом соотношении (кривые 1 на рис. 1). Однако при повышении температуры наблюдается смещение температурного пика в область более высоких обводненностей (кривые 2 и 3 на рис. 2). Это объясняется тем, что при повышении температуры происходит изменение диэлектрических параметров среды, т.е. изменяются условия образования устойчивого двойного электрического слоя. Например, при температуре 22°C устойчивый двойной электрический слой образуется при соотношении воды и нефти в поровом пространстве 30 : 70 (%), а при температуре 50°C – при соотношении воды и нефти 50 : 50 (%).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проведенных исследований обнаружено, что зависимости диэлектрических параметров водонефтенасыщенных горных пород от содержания воды в поровом пространстве имеют форму резонансных кривых с пиком при 30%. Такой тип зависимостей объясняется образованием двойного электрического слоя на границе нефти с водой. Поэтому при насыщении пород только нефтью или только водой подобный резонанс отсутствует.

Нагрев исследуемых образцов в высокочастотном электромагнитном поле эффективной частоты подтвердил взаимосвязь интенсивности нагрева водонефтенасыщенных пород с диэлектрическими параметрами среды. Показано, что по мере нагрева исследуемых образцов интенсивность нагрева изменяется. Это объясняется зависимостью условий образования двойного электрического слоя от температуры.

Полученные результаты будут полезны при выработке рекомендации для промышленного использования высокочастотного электромагнитного воздействия на нефтяные пласты.

Работа выполнена при поддержке Сколковского института науки и технологий (соглашение № 700-MRA).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Давлетбаев А.Я., Ковалева Л.А., Зиннатуллин Р.Р. Способ разработки залежи высоковязкой нефти. Патент РФ № 2454532. Б.И. № 18. 2012.
2. Ковалева Л.А., Зиннатуллин Р.Р., Султангужин Р.Ф., Шрубковский И.И., Мясников А.В. Экспериментальные исследования нагрева нефтенасыщенных горных пород электромагнитным полем // ТВТ. 2017. Т. 55. № 5. С. 858.
3. Хабибуллин И.Л., Назмутдинов Ф.Ф. К теории нагрева сред электромагнитным излучением // Вестн. Башкирск. ун-та. 2014. Т. 19. № 2. С. 381.
4. Челидзе Т.Л., Деревянко А.И., Куриленко О.Д. Электрическая спектроскопия гетерогенных систем. Киев: Наукова думка, 1977.
5. Зиннатуллин Р.Р., Фатхуллина Ю.И., Камалдинов И.М. Исследование образования адсорбционной пленки методом высокочастотной диэлектрической спектрометрии // ТВТ. 2012. Т. 50. № 2. С. 316.
6. Брандт А.А. Исследование диэлектриков на сверхвысоких частотах. М.: Физматгиз, 1963. 404 с.
7. Саяхов Ф.Л., Ковалева Л.А., Галимбеков А.Д., Хайдар А.М. Электрофизика нефтегазовых систем. Учеб. пособ. Уфа: РИО БашГУ, 2003. 190 с.
8. Фатыхов М.А., Шагапова Р.Р. Диэлектрические свойства дисперсных сред, насыщенных битумной нефтью // Электронная обработка материалов. 2004. № 6. С. 75
9. Garrouch A.A., Sharma M.M. The Influence of Clay Content, Salinity, Stress, and Wettability on the Dielectric Properties of Brine-Saturated Rocks: 10 Hz to 10 MHz // Geophys. 1994. V. 59. № 6. P. 909.
10. Knight R., Abad A. Rock/Water Interaction in Dielectric Properties: Experiments with Hydrophobic Sandstones // Geophys. 1995. V. 60. № 2. P. 431.