раздел ФИЗИКА

УДК 537.226.83, 537.868.3

**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ
ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ НА НЕФТЯНЫЕ СЛАНЦЫ****Л. А. Ковалева*, Р. Р. Зиннатуллин, Р. Ф. Султангужин,
Э. С. Сектаров, А. В. Шашков***Бакирский государственный университет
Россия, Республика Башкортостан, 450076 г. Уфа, ул. Заки Валиди, 32.*

При разработке сланцевых залежей электромагнитные поля высокочастотного (ВЧ) и сверхвысокочастотного (СВЧ) диапазонов могут использоваться для разогрева призабойной зоны пласта. Преимуществом электромагнитного нагрева является возможность распространения электромагнитных волн глубоко в пласт, тем самым нагревая его. При этом степень взаимодействия электромагнитного поля с нефтяными дисперсными средами (НДС) зависит от диэлектрических параметров НДС. При этом нефтяные дисперсные системы имеют разнообразные частотные и температурные зависимости диэлектрических параметров. Поэтому предварительное исследование диэлектрических свойств НДС является актуальной задачей.

Ключевые слова: нефтяные сланцы, диэлектрические свойства, высокочастотные и сверхвысокочастотные электромагнитные поля, нагрев, термические напряжения.

Введение

При воздействии электромагнитных полей в широком диапазоне частот от 100 кГц и до 2.4 ГГц на сланцы, содержащие кероген происходит нагрев керогена. Нагрев сланца до температур в диапазоне 200–360°C и выдерживание их при данных температурах в течение определенного периода времени приводит к процессу пиролиза, в ходе которого из сланца выделяется маловязкая нефть, газ и пар. Основной задачей при этом является выбор эффективной частоты. Если электромагнитное поле на выбранной частоте действует на сланец путем все-направленной антенны и тщательно контролируется по амплитуде и согласованию, оно будет постепенно проникать в сланцевый пласт, обеспечивая высокое извлечение нефти [1].

Кроме этого, воздействие электромагнитного поля определенной частоты на сланцевую породу может привести к развитию в ней термоупругих напряжений, трещиноватости, разупрочнению и

разрушению породы. Термические напряжения возникают в результате термического расширения породы при ее неравномерном нагреве. Как известно, сланцевая порода состоит из набора различных минералов: кварц, полевой шпат, слюда, которые ведут себя по-разному по отношению к электромагнитному нагреву из-за разности в их диэлектрических параметрах, чем и обуславливается неравномерный нагрев сланца в целом [2–3]. Поэтому ключевым моментом является выбор эффективной частоты и мощности электромагнитного излучения применительно к конкретному объекту воздействия.

**Исследование диэлектрических
свойств сланцев**

В качестве объектов исследования были выбраны образцы пород баженовской и доманиковой свиты (рис. 1).

Рис. 1. Объекты исследования.

Рис. 2. Общий вид установки исследования диэлектрических параметров кернов.

1 – измеритель добротности Е4-11, 2 – мультиметр, 3 – термошкаф с измерительной ячейкой, 4 – измеритель добротности ВМ 560.

Рис. 3. Частотные зависимости относительной диэлектрической проницаемости ϵ' для исследуемых образцов при температуре 110°C.

Рис. 4. Частотные зависимости тангенса угла диэлектрических потерь $\operatorname{tg} \delta$ для исследуемых образцов при температуре 110°C.

Для исследования диэлектрических свойств образцов была собрана специальная установка, которая позволяет проводить исследования в диапазоне частот 50 кГц–300 МГц и температур 20–150°C (рис. 2).

На рис. 3–4 представлены частотные зависимости ϵ' , $\operatorname{tg} \delta$ для исследуемых образцов при температуре 110°C.

На рис. 5 представлены частотные зависимости $\operatorname{tg} \delta$ для образца 3П_⊥ при разных температурах, из которой видно, что смещение максимумов $\operatorname{tg} \delta$ по частоте с ростом температуры не значительно.

Результаты исследований показали, что при температуре 110°C значения ϵ' для образца 4П_{||} в

исследуемом диапазоне частот уменьшаются с ростом частоты примерно в 1.5 раза (в среднем от 65 до 40). Для образцов 3П_{||} и 4П_⊥ в исследуемом диапазоне частот значения ϵ' остаются постоянными в пределах погрешности. Для образца 3П_⊥ в исследуемом диапазоне частот уменьшаются с ростом частоты примерно в 1.5 раза (в среднем от 40 до 25). Частотные зависимости $\operatorname{tg} \delta$ для образцов 3П_{||}, 4П_{||}, 4П_⊥ при температуре 110°C имеют ярко выраженные максимумы в области 60–85 МГц. Для образца 3П_⊥ $\operatorname{tg} \delta$ в исследуемом диапазоне частот при температуре 110°C дисперсию не испытывает.

Рис. 5. Частотные зависимости тангенса угла диэлектрических потерь для образца $3\Pi_{\perp}$ при исследуемых температурах.

Рис. 6. Температурные зависимости относительной диэлектрической проницаемости' для исследуемых образцов при частоте 15 МГц.

При других температурах исследования получены аналогичные кривые. По полученным данным можно сделать следующие выводы:

- Значения ϵ' для исследуемых образцов на порядок выше, чем для терригенных пород. С ростом температуры среднее значение ϵ' возрастает 2–3 раза.
- Значения $\text{tg}\delta$ для исследуемых образцов на порядок выше терригенных пород. Частотные зависимости $\text{tg}\delta$ для исследуемых образцов имеют в основном ярко выраженные максимумы в диапазоне 60–85 МГц.
- Сильное смещение максимумов $\text{tg}\delta$ по частоте с ростом температуры не прослеживается, в связи с этим для воздействия на исследуемые образцы можно рекомендовать генератор фиксиро-

ванной разрешенной частоты из указанного диапазона.

На рис. 6–7 представлены температурные зависимости ϵ' и $\text{tg}\delta$ для исследуемых образцов при фиксированной частоте электромагнитного поля равной 15 МГц, наиболее близкой к одной из разрешенных частот (13.56 МГц). Из рис. 6–7 видно, что для образцов $3\Pi_{||}$ и $3\Pi_{\perp}$ ϵ' с ростом температуры интенсивно растет до 80°C. Дальше для $3\Pi_{||}$ остается на том же уровне, для $3\Pi_{\perp}$ снижается. Для образцов $4\Pi_{||}$ и $4\Pi_{\perp}$ ϵ' в исследуемом диапазоне температур проходит через максимум при 110°C. Для всех исследуемых образцов $\text{tg}\delta$ с ростом температуры снижается примерно в 2 раза. Для образцов $3\Pi_{\perp}$, $4\Pi_{||}$ и $4\Pi_{\perp}$ интенсивное снижение наблюдается до 80°C.

Рис. 7. Температурные зависимости тангенса угла диэлектрических потерь для исследуемых образцов при частоте 15 МГц.

Полученные результаты могут быть полезны при математическом моделировании электромагнитного нагрева изучаемых сред. Моделирование динамики нагрева насыщенных пористых сред электромагнитным излучением при проявлении нелинейных эффектов за счет зависимости диэлектрических параметров сред от температуры рассмотрены в работах [4–5]. Показано, что за счет изменения диэлектрических параметров в зависимости от температуры, процесс нагрева может значительно ускоряться.

Исследование воздействия электромагнитных полей на сланцы

Исследования воздействия электромагнитных полей на исследуемые сланцы проводились в высокочастотном (ВЧ) и сверхвысокочастотном (СВЧ) диапазонах. Для исследования 8 образцов (4 бажена и 4 даманика) размером 30х30 мм. Перед проведением экспериментов по ВЧ или СВЧ электромагнитному воздействию поверхность образцов исследуется под оптическим микроскопом. При проведении ВЧ воздействия используется генератор с рабочей частотой 13.56 МГц мощностью 0.5 кВт. При проведении СВЧ воздействия используется магнетрон с рабочей частотой 2.4 ГГц, мощностью 0.5 кВт. Исследуемые образцы пород при обработке электромагнитным полем помещаются в фторопластовую ячейку размером 35 мм (диаметр) х 60 мм (высота). В ходе проведения эксперимента определяется динамика изменения температуры образцов, и отмечаются наблюдаемые эффекты (начало трещинообразования, выделение углеводородных флюидов или воды и другие). Время обработки выбирается индивидуально с целью достижения температуры 250–300°C (или максимально возможной, если температуры 250°C достичь невозможно). После проведения эксперимента структура поверхности образцов исследуется с помощью оптического микроскопа.

На рис. 8. представлена динамика изменения температуры исследуемых образцов при воздействии СВЧ электромагнитным полем. В таблице 1. приведены средние интенсивности нагрева образцов, потеря массы после нагрева и температура, при которой наблюдалась первая трещина.

Рис.8. Динамика температуры исследуемых образцов при воздействии СВЧ электромагнитным полем.

Таблица 1

Интенсивность нагрева потеря массы образцов при СВЧ воздействии

№обр.	1 (дом.)	2 (баж.)	3 (баж.)	4 (дом.)
°C/мин	112.3	516.6	201.3	258.8
$\Delta m, г$	0.6415	0.0897	0.5289	1.3571
$T_{трещино-обр.}$	286.1	296.4	I – 69.5 II – 128.3	258.8

Результаты исследований показали, что наиболее интенсивно при СВЧ воздействии нагревается образец №2 (баженовской свиты) с минимальной потерей массы. Интенсивность нагрева – 516.6°C/мин при мощности 14.5 Вт/г. Образование трещин наблюдается у всех образцов в диапазоне 250–300°C, кроме обр. №3 который изначально был с микротрещиной. При температуре 69.5°C микротрещина расширилась, а при температуре 128.3°C образовалась вторая трещина. При воздействии на образцы СВЧ полем наблюдалось выделение дыма со специфическим запахом.

Обр. №1 (увеличение x12)

Обр. №1 (увеличение x48)

Рис. 9. Фотографии микроструктуры образца №1 после СВЧ воздействия.

На *рис. 9.* приведены фотографии микроструктуры поверхности образца №1 после воздействия СВЧ электромагнитного поля.

Заключение

Результаты исследований показали, что:

1. Значения ϵ' и $\tan \delta$ для исследуемых образцов сланца на порядок выше, чем для терригенных пород. С ростом температуры среднее значение ϵ' возрастает 2–3 раза. Частотные зависимости $\tan \delta$ для исследуемых образцов имеют в основном ярко выраженные максимумы в диапазоне 60–85 МГц. Сильное смещение максимумов $\tan \delta$ по частоте с ростом температуры не прослеживается, в связи с этим для воздействия на исследуемые образцы можно рекомендовать генератор фиксированной разрешенной частоты из указанного диапазона.

2. Интенсивность нагрева образцов баженоской свиты в среднем вдвое выше, чем образцов доманиковой свиты. При этом максимальная интенсивность нагрева для доманика составила 258.8°C/мин, а для бажены – 516.6°C/мин (удельная мощность генератора 15 Вт/г).

3. Немаловажным и обнадеживающим результатом электромагнитного воздействия является образование трещин, которое наблюдается у всех образцов в диапазоне 250–300°C.

ЛИТЕРАТУРА

1. Макогон Ю. Ф., Саяхоф Ф. Л., Хабибуллин И. Л. Способ добычи нетрадиционных видов углеводородного сырья. ДАН СССР, 1989. 306. №4. С. 941–943.
2. Красновский С. С. Управление процессом разрушения горных пород в интенсивных электромагнитных полях // Горный информационно-аналит. бюллетень (научно-техн. журнал). 1999. №3.
3. Менжулин М. Г., Соколова Н. В., Шишов А. Н., Хоминский В. А. Исследование процессов трещинообразования в скальных породах под действием электромагнитных полей // Труды Междунар. научного симпозиума «Неделя горняка-98». М.: НИТУ МИСиС. 2–6 февраля 1998 г. С. 164–165.
4. Хабибуллин И. Л., Назмутдинов Ф. Ф., Хамитов А. Т. Моделирование процессов тепло- и массопереноса в пористых средах при фазовых превращениях, инициируемых микроволновым нагревом. Теплофизика высоких температур, 2014. Т. 52. №5. С. 727.
5. Хабибуллин И. Л. Нелинейные эффекты при нагреве сред электромагнитным излучением. Инженерно-физ. журнал, 2000. Т. 73. №4. С. 832–838.

Поступила в редакцию 04.12.2018 г.

EXPERIMENTAL STUDY OF THE INFLUENCE OF HIGH FREQUENCY AND MICROWAVE ELECTROMAGNETIC FIELDS ON OIL SHALES

© L. A. Kovaleva*, R. R. Zinnatullin, R. F. Sultanguzhin,
E. S. Sektarov, A. V. Shashkov

*Bashkir State University
32 Zaki Validi Street, 450076 Ufa, Republic of Bashkortostan, Russia.*

**Email: liana-kovaleva@yandex.ru*

Under the influence of electromagnetic fields of a wide frequency range (from 100 kHz to 2.4 GHz), the kerogen inside oil shales starts to heat up. Heating the shale to the temperature of 200–360 °C and holding this temperature for a certain period leads to a process of low-viscosity fluid with release of gas and steam. The main task here is to select the effective frequency. If electromagnetic field with a definite frequency have an affect on a shale by means of an omnidirectional antenna and carefully monitored in terms of amplitude and matching, it will gradually penetrate into the shale reservoir and provide high extraction of oil. Moreover, the effect of electromagnetic field of a certain frequency on a shale rock can lead to growth of non-thermoelastic stresses, weakening and rock breaking. Thermal stresses occur as a result of rock thermal expansion at uneven heating. As it is known, shale rock consists of different minerals such as quartz, feldspar, mica that behave differently under electromagnetic heating because they have different dielectric parameters. This fact generally results in uneven heating of shale rock. Therefore, the key moment is a choice of electromagnetic radiation frequency and power relating to specific object of impact. The results of experimental studies of dielectric properties (specific dielectric constant, loss tangent of a dielectric) of Bazhenov and Domanic shale formations in a frequency and temperature diapasons of 1–100 MHz and 25–150 °C are presented in the article. The results of studying the influence of high frequency and microwave electromagnetic fields on the rock samples are given.

Keywords: oil shale, dielectric properties, high frequency and microwave electromagnetic fields, heating, thermal stresses.

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

REFERENCES

1. Makogon Yu. F., Sayakhof F. L., Khabibullin I. L. Sposob dobychi netraditsionnykh vidov uglevodorodnogo syr'ya. DAN SSSR, 1989. 306. No. 4. Pp. 941–943.
2. Krasnovskii S. S. Gornyi informatsionno-analit. byulleten' (nauchno-tekhn. zhurnal). 1999. No. 3.
3. Menzhulin M. G., Sokolova N. V., Shishov A. N., Khominskii V. A. Trudy Mezhdunar. nauchnogo simpoziuma «Nedelya gornyaka–98». Moscow: NITU MISiS. 2–6 fevralya 1998 g. Pp. 164–165.
4. Khabibullin I. L., Nazmutdinov F. F., Khamitov A. T. Modelirovanie protsessov teplo- i massoperenosa v poristyykh sredakh pri fazovykh prevrashcheniyakh, initsiiuemykh mikrovolnovym nagrevom. Teplofizika vysokikh temperatur, 2014. Vol. 52. No. 5. Pp. 727.
5. Khabibullin I. L. Nelineinye efekty pri nagreve sred elektromagnitnym izlucheniem. Inzherno-fiz. zhurnal, 2000. Vol. 73. No. 4. Pp. 832–838.

Received 04.12.2018.