

УДК 537.868.3

ИССЛЕДОВАНИЕ НАГРЕВА НЕФТЕМАТЕРИНСКИХ ПОРОД В ВЫСОКОЧАСТОТНОМ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОМ ПОЛЕ МЕТОДОМ ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

© 2022 г. Р. Р. Зиннатуллин*, А. А. Мусин, Л. А. Ковалева

Башкирский государственный университет, г. Уфа, Россия

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

Поступило в редакцию 25.03.2021 г.

После доработки 23.09.2021 г.

Принято к публикации 28.09.2021 г.

В работе проведены экспериментальные и численные исследования нагрева нефтематеринских пород при воздействии высокочастотным электромагнитным полем. Исследования проводятся при частоте электромагнитного поля 13.56 МГц. Приведены результаты исследования диэлектрических параметров нефтематеринских пород в высокочастотной области при разных температурах в диапазоне от 25 до 150°C. Построена математическая модель электромагнитного воздействия на образцы нефтематеринских пород, включающая в себя уравнение теплопроводности с распределенными источниками тепла. Плотность распределенных источников тепла является функцией напряженности электрического поля и диэлектрических параметров насыщенной пористой среды. Приведены результаты моделирования распределения температуры в образцах нефтематеринских горных пород при высокочастотном электромагнитном воздействии.

DOI: 10.31857/S0040364422010082

ВВЕДЕНИЕ

Основной технологической задачей при разработке залежей нефтематеринских пород является интенсивный нагрев залегающих пластов. Нагрев нефтяных сланцев до 400°C и выдерживание их при данных температурах в течение определенного периода времени инициирует процесс пиролиза, в ходе которого из породы выделяется маловязкая нефть, газ и пар [1]. При этом нагреть породу до необходимой температуры оказывается возможным и удобным с помощью источников электромагнитной (ЭМ) энергии. В работах [2–8] приводятся результаты успешных лабораторных и экспериментально-промысловых испытаний системы обогрева нефтяных пластов высокочастотным (ВЧ) электромагнитным полем, где описывается возможность нагрева пласта электромагнитной энергией, а также техника и оборудование для его осуществления. Технология ВЧ-нагрева реализуется через добывающую скважину. Количество энергии для разогрева пласта до нужной температуры зависит от режимов воздействия (мощность и время), которые выбираются исходя из диэлектрических свойств нефтеносных пород. Анализ результатов исследований диэлектрических параметров нефтематеринских горных пород показал, что значения относительной диэлектрической проницаемости ϵ' для исследованных образцов на порядок выше, чем для терригенных пород [9, 10]. Кроме

того, частотные зависимости тангенса угла диэлектрических потерь $\operatorname{tg}\delta$ для нефтематеринских пород имеют ярко выраженные максимумы в диапазоне значений от 50 до 125 МГц при температурах 75°C и выше. С ростом температуры до 130°C значения ϵ' и $\operatorname{tg}\delta$ для исследуемых образцов возрастают, а при 150°C заметно снижаются, что объясняется рядом фазовых превращений в сланцевой породе при нагреве в исследуемом диапазоне температур. Значения ϵ' и $\operatorname{tg}\epsilon$ вдоль слоев приблизительно в 1.5–4 раза выше, чем поперек слоев. Все это дает хорошие предпосылки для исследований нагрева нефтематеринских пород в электромагнитных полях и использования электромагнитного поля при разработке таких месторождений. Для обоснования проведенных экспериментов и прогнозирования распределения тепла в продуктивном пласте при воздействии электромагнитным полем в данной работе проводится математическое моделирование электромагнитного воздействия на нефтематеринские горные породы.

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ

В качестве объектов исследования были выбраны два образца горной породы баженовской свиты, отобранные из разных скважин. Образцы имеют одинаковые геометрические размеры. Значения коэффициентов пористости, теплопроводности, теплоемкости и плотности фаз взяты средние для

пласта. Образцы отличаются диэлектрическими параметрами.

На первом этапе исследовались диэлектрические параметры (диэлектрическая проницаемость ϵ' , тангенс угла диэлектрических потерь $\operatorname{tg} \delta$) объектов на лабораторной установке в диапазоне частот от 1 до 100 МГц и температур 20–150°C. В методике используются измерители добротности ВМ 560 (диапазон частот – 50 кГц–35 МГц) и Е4-11 (диапазон частот – 30–300 МГц). Измерения проводились с использованием ячейки, предназначенной для измерения диэлектрических параметров твердых диэлектриков при заданной температуре. Для моделирования необходимых температурных условий ячейка помещалась в термошкаф, где выдерживалась в течение 30 мин при заданной температуре. Далее при заданной частоте определялись диэлектрические параметры.

На втором этапе исследовалось влияние ВЧ ЭМ-поля на исследуемые образцы. Обработка проводилась на лабораторном стенде, состоящем из высокочастотного генератора фиксированной частоты 13.56 МГц и регулируемой выходной мощности до 2.5 кВт. Узел обработки образцов представляет собой цилиндрический конденсатор, подключаемый к колебательному контуру высокочастотного генератора. Образцы при обработке электромагнитным полем помещались между обкладками цилиндрического конденсатора. Для теплоизоляции и предотвращения испарения легких фракций углеводородов образцы помещались внутрь фторопластовой ячейки. Эксперименты проводились при выходной мощности генератора 500 Вт. В ходе эксперимента определялась динамика изменения температуры образцов при помощи регистратора температуры.

В соответствии с физической моделью в математической модели рассматривается образец нефтематеринской породы цилиндрической формы высотой h и диаметром d . Под действием электромагнитного поля в среде возникают внутренние распределенные источники тепла. Для моделирования распределения температуры в исследуемых образцах и определения вклада межфазного теплообмена в динамику температуры в образце насыщенная пористая среда рассматривается как сплошная среда с усредненными значениями физических величин. Считается, что температуры фаз мгновенно выравниваются. Плотность, теплоемкость и коэффициент теплопроводности насыщенной пористой среды являются аддитивными величинами. Распределение температуры определяется из решения уравнения теплопроводности для насыщенной пористой среды:

$$c_p \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla(\lambda \nabla T) + q,$$

$$c_p = (1 - m)c_s \rho_s + mc_f \rho_f,$$

$$\lambda = (1 - m)\lambda_s + m\lambda_f,$$

$$q = \frac{2\pi f \epsilon_0 \epsilon' \operatorname{tg} \delta}{2} |E|^2. \quad (1)$$

Здесь m – пористость; ρ_f, ρ_s – плотности насыщающего флюида и скелета пористой среды соответственно; c_f, c_s – теплоемкости насыщающего флюида и скелета пористой среды; c_p – объемная теплоемкость насыщенной пористой среды; $\lambda, \lambda_f, \lambda_s$ – коэффициенты теплопроводности насыщенной пористой среды, насыщающего флюида и скелета пористой среды; ϵ_0 – электрическая постоянная; f – частота электромагнитного поля; q – плотность распределенных источников тепла в насыщенной пористой среде; E – напряженность электрического поля.

Начальные и граничные условия записываются в соответствии с условиями эксперимента. В начальный момент времени температура образцов пород равна комнатной:

$$T(t = 0) = T_0.$$

На всех границах задается теплообмен с окружающей средой:

$$-\lambda \frac{\partial T}{\partial n} = \alpha_0 (T - T_0).$$

При расчетах приняты следующие значения параметров: $d = 0.03$ м; $h = 0.03$ м; $m = 0.105$; $\rho_s = 2700$, $\rho_f = 1300$ кг/м³; $\lambda_s = 1.9$, $\lambda_f = 0.128$ Вт/(м К); $c_s = 1050$, $c_f = 1465$ Дж/(кг К).

В экспериментах образец горной породы помещался в центр фторопластового кожуха цилиндрической формы. Между фторопластом и породой имелась воздушная прослойка (кольцевой зазор). При моделировании граничное условие на поверхности породы задавалось в виде теплообмена в кольцевом зазоре. Это граничное условие является более точным, чем условие теплоизоляции на границе.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

На рис. 1 представлены температурные зависимости произведения $\epsilon' \operatorname{tg} \delta$ для исследуемых образцов при фиксированной частоте электромагнитного поля, равной 15 МГц, наиболее близкой к одной из разрешенных для использования частот (13.56 МГц). Для исследуемых образцов произведение диэлектрических параметров с ростом температуры растет и проходит через максимум при 130°C для образца № 1 и при 110°C для образца № 2. По полученным экспериментальным данным с использованием формулы (1) были рассчитаны значения объемных источников тепла при соответствующих температурах. Они использовались при математическом моделировании процессов на-

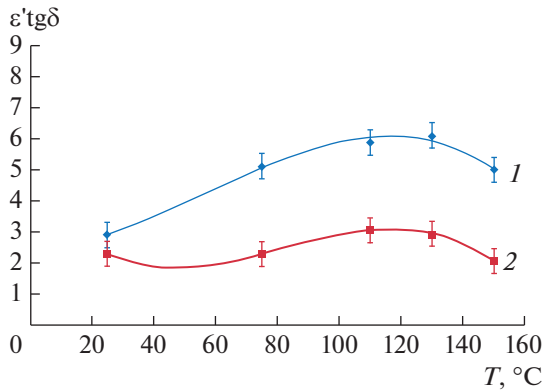


Рис. 1. Температурные зависимости диэлектрической проницаемости для исследуемых образцов при частоте 15 МГц: 1 – образец № 1, 2 – № 2.

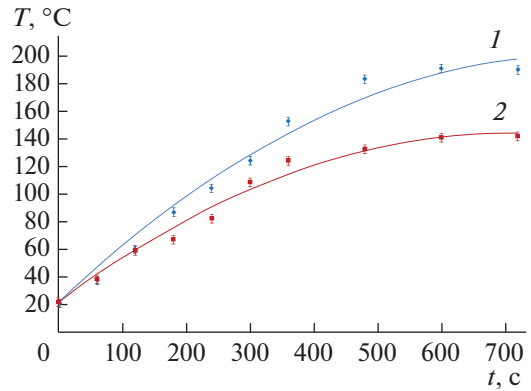


Рис. 2. Динамика роста температуры образцов (1 – образец № 1, 2 – № 2) при ВЧ ЭМ-воздействии: маркеры – экспериментальные точки, кривые – расчет.

грева объектов в высокочастотном электромагнитном поле.

На рис. 2 представлены экспериментальные данные и расчетные кривые динамики роста температуры образцов в процессе электромагнитного воздействия. Видно, что в пределах погрешности расчетные кривые повторяют экспериментальные данные. Кроме количественных различий наблюдается также небольшое отличие в поведении кривых. Особенно это различие прослеживается в результатах, полученных для образца № 1, по которым видно, что после достижения 190°C интенсивность нагрева снижается. Это может быть связано с процессами фазового перехода или эндотермическими реакциями, которые могут протекать в образцах при повышении температуры. Данные процессы в математической модели не учитываются. Для их правильного учета нужно проводить комплексные экспериментальные исследования. В частности, необходимо знать состав исходных и конечных продуктов реакции и проводить их анализ в процессе экспериментов.

Нагрев керогена, содержащегося в нефтематеринских породах, до определенной температуры приводит к началу пиролиза, в ходе которого кероген превращается в маловязкую нефть, газ и пар. Увеличение мольной доли газовой фазы в смеси при достижении определенных термобарических условий может способствовать росту давления в образце породы в случае неизменного объема, занимаемого системой, и вызывать растрескивание образцов. Все это приводит к уменьшению диэлектрических параметров всей системы (рис. 1) и, соответственно, снижению интенсивности нагрева.

Моделирование динамики температуры в образце породы при электромагнитном воздействии рассматривалось на примере образца с высокой плотностью распределенных источников тепла

(образец № 1). На рис. 3 приведены результаты моделирования. Происходит постепенное повышение температуры во всем образце. Температура в центре образца значительно выше температуры боковой поверхности. Это связано с увеличением интенсивности теплообмена с окружающей средой на поверхности образца при повышении температуры. В вертикальном сечении также наблюдается разница температур. Температура в центре образца выше температуры на поверхности. Разница температур между центром и верхней частью достигает 3°C, между центром и боковой поверхностью – до 20°C и со временем возрастает. Такие высокие значения градиента температур могут привести к возникновению заметных температурных напряжений в образце, которые при определенных условиях приведут к образованию трещин. При этом, если будет наблюдаться неоднородность поглощения энергии поля в среде, градиент температур может оказаться значительно выше.

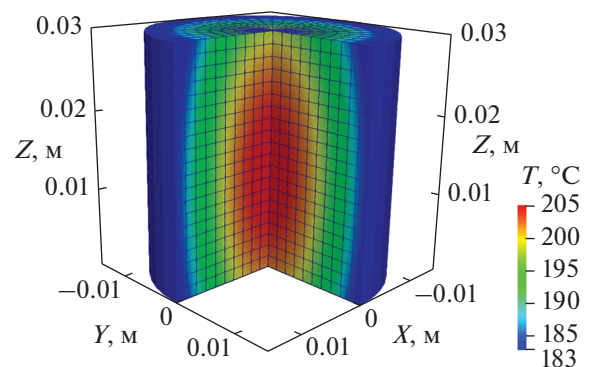


Рис. 3. Распределение температуры в образце № 1 в момент времени 10 мин.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проведенных исследований обнаружено, что для рассматриваемых образцов произведение диэлектрических параметров $\epsilon' \tan \delta$ с ростом температуры увеличивается и проходит через максимум. При электромагнитном нагреве исследуемых образцов наблюдаются особенности в поведении кривых динамики температуры. После достижения определенной температуры интенсивность нагрева снижается. Это может быть связано с процессами фазового перехода, которые могут протекать в образцах при повышении температуры, что также подтверждается температурными зависимостями диэлектрических параметров.

Моделированием динамики температур в образце породы при электромагнитном воздействии показано, что температуры в центре и на боковой грани образца могут различаться на более чем 20°C . Такие значения градиента температур могут привести к возникновению температурных напряжений в образце, которые при определенных условиях приведут к образованию трещин. Если же будет наблюдаться неоднородность поглощения энергии поля в среде, градиент температур может оказаться значительно выше.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 20-05-00535 А.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Мартемьянов С.М.* Моделирование подземного нагрева горючих сланцев. Дис. ... канд. техн. наук. Томск: Томск. политех. ун-т, 2013. С. 5.
2. *Ковалева Л.А., Зиннатуллин Р.Р., Султангузин 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. *Sultanguzhin R., Kovaleva L., Zinnatullin R.* Radio Frequency and Microwave Impact on Source Rock // Radiation and Scattering of Electromagnetic Waves (RSEMW). 24–28 June 2019. IEEE. 2019. P. 1. <https://doi.org/10.1109/RSEMW.2019.8792780>
5. *Zhu J., Yang Zh., Li X., Qi Sh., Jia M.* Application of Microwave Heating with Iron Oxide Nanoparticles in the *in-situ* Exploitation of Oil Shale // Energy Sci. Eng. 2018. V. 6. № 5. P. 548.
6. *Despande R., Wright B.N., Watt A.* Techniques for Installing Effective Solvent Extraction Incorporating Electromagnetic Heating (“ESEIEH”) Completions // World Heavy Oil Conf. Edmonton, Alberta, Canada, 2015. Paper WHOC15-317.
7. *Rassenfoss S.* Oil Sands Get Wired-seeking More Oil, Fewer Emissions // J. Pet. Technol. 2012. V. 64. № 9. P. 34.
8. *Балакирев В.А., Сотников Г.В., Ткач Ю.В., Яценко Т.Ю.* Микроволновые методы интенсификации добычи нефти // Электромагнитные явления. 2001. Т. 2. № 2(6). С. 255.
9. *Зиннатуллин Р.Р., Ковалева Л.А., Султангузин Р.Ф.* Исследование диэлектрических свойств водонефтенасыщенных горных пород и их нагрева в электромагнитном поле // ТВТ. 2019. Т. 57. № 1. С. 143.
10. *Zinnatullin R.R., Sultanguzhin R.F.* Studying Dielectric Properties of Oil Shale // J. Phys.: Conf. Ser. 2020. V. 1675. № 1. 012102.