

УДК 537.868.3

ФИЗИЧЕСКОЕ И МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ ПО ДЛИНЕ НЕФТЕМАТЕРИНСКОЙ ПОРОДЫ ПРИ МИКРОВОЛНОВОМ ОБЛУЧЕНИИ

© 2023 г. Р. Р. Зиннатуллин*, А. А. Мусин, И. В. Гайсин, Б. А. Усманов**

Башкирский государственный университет, г. Уфа, Башкортостан, Россия

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

***E-mail: bulatusman@mail.ru*

Поступило в редакцию 10.08.2022 г.

После доработки 08.11.2022 г.

Принято к публикации 06.12.2022 г.

Приведены результаты физического и математического моделирования распределения температуры в образце нефтематеринской породы при одностороннем микроволновом облучении. Исследования выполнены при частоте излучения 2.45 ГГц. Математическая модель валидирована по результатам физического моделирования диэлектрического нагрева нефтематеринской породы до 115°C. Проведены прогнозные расчеты в масштабах реального объекта. Приведенные результаты показывают объемный характер нагрева образца при микроволновом облучении. Определены интенсивности диэлектрического нагрева нефтематеринской породы при температурах пиролиза керогена, а также глубина проникновения электромагнитного поля при пиролизе керогена.

DOI: 10.31857/S004036442301009X

ВВЕДЕНИЕ

Нефтематеринские породы представляют собой тонкозернистые осадочные породы, содержащие органическое вещество – кероген. Нагрев керогеносодержащих пород до температур 200–400°C и выдерживание их при данных температурах в течение определенного периода времени приводят к инициализации процесса пиролиза керогена, в ходе которого из породы выделяются маловязкая нефть, газ и пар [1]. При этом эффективно нагреть нефтематеринскую породу до необходимых температур возможно с помощью микроволнового излучения. В работах [1–4] приводятся результаты, показывающие наибольшую интенсивность нагрева нефтематеринских пород при микроволновом облучении с частотой 2.45 ГГц. Интенсивность нагрева в зависимости от диэлектрических свойств пород достигала 500°C/мин. Если электромагнитное поле при выбранной частоте действует на породу с помощью всенаправленной антенны и тщательно контролируется по амплитуде и согласованию, оно будет постепенно проникать в пласт, обеспечивая высокое извлечение нефти. В промышленных условиях электромагнитный нагрев пласта может реализоваться через одну скважину распространением электромагнитного излучения от забойного излучателя вглубь пласта. Возможно создание излучателей как направленного, так и всестороннего действия. При этом единственным различием между направ-

ным и всесторонним излучением является плотность потока электромагнитной энергии ввиду различной геометрии распространения электромагнитных волн и, соответственно, различной площади сечения. Компенсировать это можно регулированием выходной мощности источника электромагнитного поля (ЭМП).

По мере проникновения и поглощения электромагнитной энергии в пласте происходит нагрев породы. Скорость распространения тепловой энергии, индуцированной электромагнитным излучением, может быть определена путем математического моделирования в масштабах пласта. Для валидации математической модели необходимо разработать экспериментальный стенд, позволяющий с максимальным приближением воспроизвести реальные условия электромагнитного воздействия на призабойную зону пласта. Целью данной работы являются создание математической модели распределения температуры по длине нефтематеринской породы на основе валидации по результатам физического моделирования и проведение прогнозных расчетов для масштабов реальных объектов.

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ

В качестве объекта исследования выбран образец горной породы баженовской свиты цилиндрической формы длиной 12 см и диаметром 10 см. На рис. 1а представлена схема лабораторного стенда

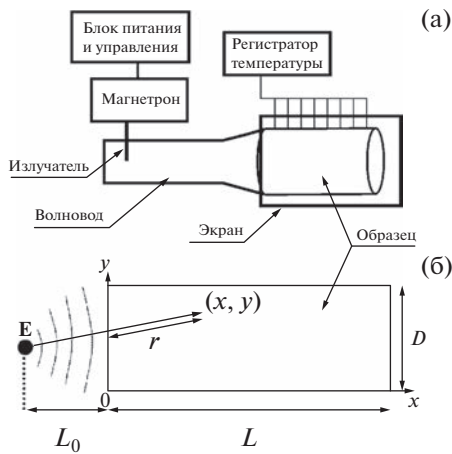


Рис. 1. Схема лабораторного стенда (а) и расчетной области (б) для физического и математического моделирования распределения температуры в образце нефтематеринской породы при диэлектрическом нагреве.

для физического моделирования распределения температуры в образце нефтематеринской породы при воздействии на него микроволновым излучением.

Конструкция стенда позволяет в ходе исследований воссоздать условия, максимально приближенные к реальному применению технологии направленного воздействия электромагнитным излучением на призабойную зону пласта. Стенд разрабатывался на основе ранее предложенного способа разработки обводненных залежей нефти СВЧ электромагнитным воздействием [5], где используется щелевидная антенна всестороннего действия. Использование излучателя направленного действия позволит осуществлять избирательное воздействие на призабойную зону пласта.

Стенд устроен следующим образом. На одном из торцов образца установлен волновод с магнетроном ($\omega = 2.45$ ГГц, $P = 800$ Вт). Выход волновода изготовлен по размерам исследуемого образца. Исследуемый образец устанавливается вплотную к выходу волновода для предотвращения излучения в окружающую среду. При этом исследуемый образец окружен защитным экраном. Замер распределения температуры по длине с шагом 1 см проводится при помощи системы термопар и регистратора температуры. Образец породы нагревается до температуры начала фазовых переходов в породе — 115°C .

Для масштабирования результатов экспериментальных исследований построена математическая модель процесса диэлектрического нагрева насыщенной пористой среды. Математическая модель валидируется экспериментальными данными для дальнейших прогнозных расчетов в масштабах реальных объектов. Математическая

модель построена средствами открытой программной среды FreeFem.

Постановка задачи при математическом моделировании исследуемого процесса следующая. Рассматривается образец нефтематеринской породы цилиндрической формы длиной L и диаметром D . Двумерная схема расчетной области, в которой решается задача, представлена на рис. 1б. В схему входит только сам образец. Расположение координатной системы показано на рис. 1б. Считается, что образец помещается в область воздействия СВЧ ЭМП напряженностью E . Под действием электромагнитного поля в среде возникают внутренние распределенные источники тепла.

При построении математической модели насыщенная пористая среда рассматривается как сплошная среда с осредненными значениями физических величин. Постановка задачи — однотемпературная. Источник ЭМП считается точечным и расположенным от образца на расстоянии L_0 (рис. 1б). Принимается, что физические параметры насыщенной пористой среды не изменяются в процессе электромагнитного воздействия.

Распределение температуры определяется из решения уравнения теплопроводности для насыщенной пористой среды с распределенными источниками тепла [5]

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\lambda}{c\rho} \Delta T + \frac{q}{c\rho},$$

где $c\rho$ — объемная теплоемкость насыщенной пористой среды, λ — коэффициент теплопроводности насыщенной пористой среды, q — плотность распределенных источников тепла в насыщенной пористой среде.

Считается, что в начальный момент времени распределение температуры однородно, а все грани образца теплоизолированы:

$$T(x, y, t = 0) = T_0 \nabla T|_{\Gamma} = 0,$$

где Γ — граница расчетной области.

В соответствии с условиями проведения эксперимента плотность распределенных источников тепла записывается с учетом затухания электромагнитной волны:

$$q = 2\alpha P_0 e^{-2\alpha r},$$

$$r = \left(1 - \frac{L_0}{x + L_0}\right) \sqrt{(x + L_0)^2 + \left(y - \frac{h}{2}\right)^2}.$$

Здесь α — коэффициент поглощения электромагнитной волны; P_0 — плотность потока энергии, излучаемой магнетроном; r — часть радиус-вектора от источника ЭМП до рассматриваемой точки, которая проходит через образец (рис. 1б). Считается, что вне образца затухания ЭМП не происходит.

Расчетные параметры

Длина расчетной области L , см	12
Диаметр расчетной области D , см	10
Расстояние от источника ЭМП до образца L_0 , см	3
Начальная температура T_0 , °C	20
Выходная мощность магнетрона P , Вт	800
Плотность образца породы ρ , кг/м ³	2700
Теплоемкость образца породы c , Дж/(кг К)	1050
Коэффициент теплопроводности образца породы λ , Вт/(м К)	1.9

Плотность потока энергии P_0 определяется как отношение выходной мощности магнетрона к площади сечения образца

$$P_0 = \frac{4P}{\pi D^2}.$$

Математическое моделирование проводилось с использованием расчетных параметров, приведенных в таблице.

Коэффициент поглощения электромагнитной волны α определяется в ходе валидации модели по экспериментальным данным.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

На рис. 2 приведены результаты физического (маркеры) и математического (сплошные линии) моделирования распределения температуры в образце при одностороннем микроволновом излучении. С помощью валидации математической модели по экспериментальным данным подобрано оптимальное значение коэффициента поглощения α , при котором результаты моделирования наилучшим образом соответствуют экспериментальным данным: $\alpha = 5.8 \text{ м}^{-1}$.

Результаты показали объемный характер нагрева образцов. В зоне до 3 см от волновода интенсивность нагрева сохраняется в пределах погрешности за все время экспериментов. В начальный период воздействия поля разница температур между начальной и конечной точками составляет в среднем 10°C. С увеличением времени воздействия поля и, соответственно, температуры в образце разница в температурах достигает 60°C. Этот факт объясняется изменением диэлектрических параметров и поглощением энергии поля вблизи волновода [6].

Расхождение между экспериментальными и численными кривыми тем больше, чем больше значение температуры (рис. 2). Количественное расхождение результатов может быть объяснено тем, что коэффициент поглощения электромагнитной волны α зависит как от параметров самой волны, так и от электрофизических свойств среды [6]:

$$\alpha = \frac{\omega \sqrt{\epsilon} \operatorname{tg} \delta}{2c_s},$$

где ω — циклическая частота электромагнитного поля, ϵ — диэлектрическая проницаемость, $\operatorname{tg} \delta$ — тангенс угла диэлектрических потерь, c_s — скорость света. Также известно, что диэлектрическая проницаемость и тангенс угла диэлектрических потерь в свою очередь изменяются в зависимости от температуры [6], при этом характер этих изменений уникален для всех материалов и зависит от их структуры, насыщенности и т.д. Существуют лишь зависимости этих параметров от температуры, которые устанавливаются экспериментально для каждого материала и диапазона частот. В данной работе в математической модели коэффициент поглощения α считается постоянным, что и вызывает ее расхождение с экспериментом. Помимо этого, в модели не учитываются гидродинамические явления, а как показано в [7], в зависимости от особенностей микроструктуры породы они могут оказывать значительное влияние на характер теплопереноса.

С помощью модели, для которой проводилась валидация экспериментальными данными, спро-

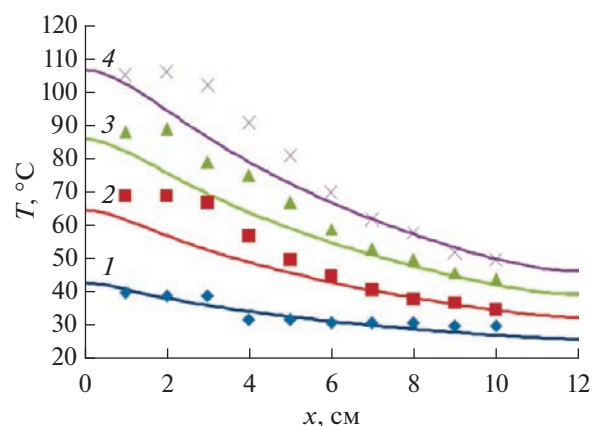


Рис. 2. Кривые распределения температуры по длине образца в моменты времени: 1 — 60 с, 2 — 120, 3 — 180, 4 — 240; маркеры — эксперимент, линии — расчет.

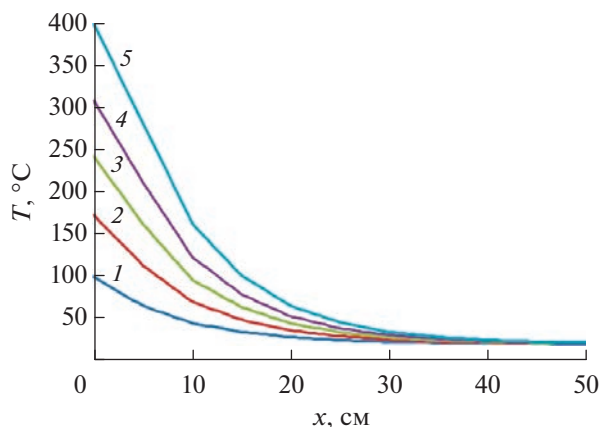


Рис. 3. Кривые распределения температуры по длине образца в различные моменты времени: 1 – 200 с, 2 – 400, 3 – 600, 4 – 800, 5 – 1084.

гнозированы времена достижения образцом температуры 300 и 400°C и глубина прогрева образца в этом температурном диапазоне в конечный момент времени. Как известно [8, 9], у некоторых пород при данных температурах происходит пиролиз. Расчетная область остается такой же за исключением увеличения ее длины до 50 см. На рис. 3 представлено распределение температуры по длине образца в разные моменты времени.

Время воздействия СВЧ-поля выбрано в соответствии с длительностью достижения образцом температуры 400°C. Тепловой фронт за 1084 с достигает глубины примерно в 40 см (рис. 3), хотя самые высокие температуры наблюдаются лишь до 10–15 см. Область, в которой возможен пиролиз, на этот момент времени составляет около 4 см. Температура 300°C достигается примерно за 800 с. Это время может быть обозначено как время начала пиролиза в образце. Таким образом, СВЧ-нагрев может рассматриваться как перспективный метод воздействия на керогенсодержащие породы с целью инициализации процесса пиролиза.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проведенных исследований показано, что диэлектрический нагрев образца нефтематеринской породы при воздействии микроволновым излучением имеет объемный характер. В зоне до 3 см от волновода интенсивность нагрева сохраняется в пределах погрешности за все время экспериментов. С ростом температуры разница температур начальной и конечной точек образца возрастает, что объясняется изменением диэлектрических параметров в зависимости от температуры. Неполное совпадение результатов физиче-

ского и математического моделирования имеет место из-за неучтенной в математической модели зависимости коэффициента поглощения электромагнитных волн от температуры. С учетом теплопроводности степень совпадения или несовпадения температурных кривых имеет различные объяснения для разных участков образца. Прогнозными расчетами в масштабах реальных объектов показано, что тепловой фронт за 18 мин достигает глубины примерно в 40 см, хотя температуры пиролиза керогена наблюдаются лишь до 4 см. Температура начала пиролиза керогена (300°C) в рассматриваемом образце достигается примерно за 13 мин.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-11-20042.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Sultanguzhin R., Kovaleva L., Zinnatullin R. Radio Frequency and Microwave Impact on Source Rock // 2019 Radiation and Scattering of Electromagnetic Waves (RSEMW). IEEE. 2019. P. 1. <https://doi.org/10.1109/RSEMW.2019.8792780>
2. Kovaleva L., Zinnatullin R., Musin A., Kireev V., Karamov T., Spasennykh M. Investigation of Source Rock Heating and Structural Changes in the Electromagnetic Fields Using Experimental and Mathematical Modeling // Minerals. 2021. V. 11. № 9. 991.
3. 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.
4. Зиннатуллин Р.Р., Ковалева Л.А., Султангузин Р.Ф. Исследование диэлектрических свойств водоненасыщенных горных пород и их нагрева в электромагнитном поле // ТВТ. 2019. Т. 57. № 1. С. 143.
5. Ковалева Л.А., Зиннатуллин Р.Р., Мусин А.А., Благодичиннов В.Н., Валиев Ш.М., Муллаянов А.И. Способ разработки обведенных залежей нефти СВЧ электромагнитным воздействием (варианты). Патент на изобретение RU № 2555731. Оpubл. 10.07.2015. Бюл. № 19.
6. Давлетбаев А.Я., Ковалева Л.А., Насыров Н.М. Исследование процессов тепломассопереноса в многослойной среде при нагревании смешивающегося агента с одновременным электромагнитным воздействием // ТВТ. 2009. Т. 47. № 4. С. 605.
7. Zinnatullin R.R., Sultanguzhin R.F. Studying Dielectric Properties of Oil Shale // J. Phys.: Conf. Ser. 2020. V. 1675. 012102.
8. Solnyshkina O.A., Batyrshin E.S., Pityuk Y.A. Investigation of Hydrodynamic Flows in Micromodels of Double Porosity Media // Fluid Dynamics. 2021. V. 56. № 4. P. 451.
9. Бычков А.Ю., Калмыков Г.А., Бугаев И.А., Калмыков А.Г., Козлова Е.В. Экспериментальные исследования получения углеводородных флюидов из пород баженовской свиты при гидротермальном воздействии // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 4. Геология. 2015. № 4. С. 34.