

EDN: IFONKO

УДК 537.868.3

## Numerical Modeling of Dynamics of Temperature and Dielectric Parameters of Source Rock Under Microwave Heating

**Bulat A. Usmanov\***,  
**Rasul R. Zinnatullin and Airat A. Musin**  
*Ufa University of Science and Technology,  
Ufa, Republic of Bashkortostan, Russian Federation*

Received 22.06.2023, received in revised form 11.07.2023, accepted 08.08.2023

**Abstract.** Results of physical and mathematical modeling of temperature distribution in an oil source rock sample under single-sided microwave irradiation are presented. A method for indirect determination of the dependence of dielectric properties of a sample on temperature using experimental data on temperature dynamics during electromagnetic heating has been developed and tested. The method consists in solving an inverse problem to establish the temperature dependence of the absorption coefficient of an electromagnetic wave, which depends on dielectric properties. Two variations of the model were created. In one of them, the absorption coefficient was assumed to be constant and homogeneous, and its value was obtained by validating the model by experimental data. The second takes into account the dependence of the absorption coefficient on temperature, the mathematical form of which was determined by solving the inverse problem. Comparison of experimental data with the results of the implementation of these models showed an increase in their quantitative convergence when using the developed method.

**Keywords:** source rock, microwave heating, electromagnetic wave absorption coefficient, dielectric properties.

**Acknowledgements.** The work was supported by the grant of the Russian Science Foundation No. 22–11–20042.

Citation: Usmanov, B.A., Zinnatullin, R.R., Musin, A. A. Numerical modeling of dynamics of temperature and dielectric parameters of source rock under microwave heating. J. Sib. Fed. Univ. Eng. & Technol., 2023, 16(6), 700–710. EDN: IFONKO



## Численное моделирование динамики температуры и диэлектрических параметров нефтематеринской породы при СВЧ-нагреве

Б. А. Усманов, Р. Р. Зиннатуллин, А. А. Мусин  
Уфимский университет науки и технологий,  
Российская Федерация, Республика Башкортостан, Уфа

**Аннотация.** Приведены результаты физического и математического моделирования распределения температуры в образце нефтематеринской породы при одностороннем микроволновом облучении. Разработан и протестирован метод косвенного определения зависимости диэлектрических свойств образца от температуры по экспериментальным данным температурной динамики во время электромагнитного нагрева. Метод заключается в решении обратной задачи для установления температурной зависимости коэффициента поглощения электромагнитной волны, который зависит от диэлектрических свойств. Было создано две вариации модели. В одной из них коэффициент поглощения считался постоянным и однородным, а его значение было получено валидацией модели экспериментальными данными. Во второй имел место учёт зависимости коэффициента поглощения от температуры, математическая форма которой была определена решением обратной задачи. Сопоставление экспериментальных данных с результатами реализации этих моделей показало увеличение их количественной сходимости при применении разработанного метода.

**Ключевые слова:** нефтематеринская порода, СВЧ-нагрев, коэффициент поглощения электромагнитной волны, диэлектрические свойства.

**Благодарности.** Работа выполнена при поддержке гранта Российского научного фонда № 22–11–20042.

Цитирование: Усманов Б. А. Численное моделирование динамики температуры и диэлектрических параметров нефтематеринской породы при СВЧ-нагреве / Б. А. Усманов, Р. Р. Зиннатуллин, А. А. Мусин // Журн. Сиб. федер. ун-та. Техника и технологии, 2023, 16(6). С. 700–710. EDN: IFONKO

### Введение

Актуальность и практическая значимость данной работы связана с необходимостью решения проблемы, остро вставшей перед российской нефтяной отраслью и связанной с существенным увеличением доли трудноизвлекаемых запасов в общей структуре запасов нефти. Месторождения трудноизвлекаемых запасов характеризуются сложным геологическим строением, низкой проницаемостью коллекторов и высокой вязкостью нефти. И если в мире добыча трудноизвлекаемых запасов составляет примерно 20 % от общей добычи, то в России вовлечено в разработку менее 1 %. Отчасти это объясняется тем, что эффективная разработка таких месторождений не может быть обеспечена существующими технологиями. Необходима разработка новых технологий, основанных на воздействии на пласт физическими полями. Одним из таких воздействий является электромагнитное воздействие на нефтеносную породу, направленное на её нагрев по меньшей мере в призабойной зоне пласта.

Физика процесса электромагнитного нагрева основана на характере поведения диэлектриков в электрических полях. Полярные молекулы диэлектрика ориентируются вдоль силовых линий внешнего электрического поля, так что направление их дипольного момента совпадает с направлением внешнего поля. В переменном электрическом поле молекулы начинают совершать

вращательные движения, при этом часть энергии электрического поля уходит на работу поворота молекул. Количество энергии, ушедшей на поляризацию дипольных молекул, оценивается величиной тангенса угла диэлектрических потерь, который является отношением активной составляющей электрического тока к реактивной. В идеальном диэлектрике величина тангенса угла диэлектрических потерь равна нулю.

Было показано, что плотность распределения тепловых источников в объеме диэлектрика при его электромагнитном нагреве выражается через диэлектрическую проницаемость и тангенс угла диэлектрических потерь [1].

По сравнению с традиционными методами нагрева призабойной зоны электромагнитный нагрев имеет ряд преимуществ: более высокая скорость нагрева, отсутствие необходимости прямого контакта между источником нагрева и нагреваемым материалом, возможность избирательного нагрева, увеличение степени контроля процесса нагрева, уменьшение размера оборудования и количества отходов.

Текущее состояние исследований и разработок указывает на то, что электромагнитная энергия может сыграть важную и, возможно, решающую роль в технологиях извлечения углеводородов из нефтематеринских пород [2–4].

В случае коллекторов и сланцев, содержащих кероген, при воздействии на них электромагнитных полей (ЭМП) нагрев происходит в достаточно широком диапазоне частот: от 100 кГц до 2,4 ГГц. Нагрев нефтяных сланцев до температур в диапазоне 200–360 °С и выдерживание их при данных температурах в течение определенного периода времени приводит к процессу пиролиза, в ходе которого из сланца выделяются маловязкая нефть, газ и пар [5–6].

Если электромагнитное поле действует на сланец путем всенаправленной антенны и тщательно контролируется по амплитуде и согласованию, оно будет постепенно проникать в сланцевый пласт, обеспечивая высокое извлечение нефти. Кроме этого, воздействие электромагнитного поля определенной частоты на сланцевую породу может привести к развитию в ней термоупругих напряжений, трещиноватости, разупрочнению и разрушению породы [7]. Термические напряжения возникают в результате термического расширения породы при её неравномерном нагреве, вызванном неоднородным распределением диэлектрических параметров [8–9].

Ключевой задачей при этом подходе является подбор оптимальных для среды с данными диэлектрическими параметрами частоты и мощности излучателя электромагнитного поля, поскольку от них зависят как скорость нагрева, так и геометрия области нагрева. Затрудняется это тем, что диэлектрические параметры среды зависят не только от её состава, но и от частоты приложенного ЭМП и от температуры [10–12]. Как правило, диэлектрические параметры измеряются соответствующим оборудованием. Этот подход ограничен тем, что это оборудование является относительно труднодоступным и дорогостоящим, а также ограниченным по частотному диапазону. Более того, с ростом температуры значительно увеличивается погрешность измерения диэлектрических параметров. В связи с этим в данной работе предложен метод определения их температурной зависимости по экспериментальным данным электромагнитного нагрева. Валидность метода подтверждена количественным совпадением экспериментальных данных с результатами численного моделирования. Проведено сравнение моделей электромагнитного нагрева с постоянными и однородными диэлектрическими свойствами, зависящими от температуры.

### Экспериментальное исследование

В качестве объекта исследования был выбран образец горной породы баженовской свиты цилиндрической формы длиной 12 см и диаметром 10 см. На рис. 1 приведена схема лабораторного стенда. Слева установлен волновод с магнетроном ( $\omega = 2,45$  ГГц,  $P = 800$  Вт). Справа под защитным экраном расположен образец керна, который был теплоизолирован. Замер температуры проводился при помощи системы термопар, помещённых на поверхность образца, и регистратора температуры. Термопары пронумерованы по направлению от излучателя и расположены на расстоянии 1 см друг от друга.

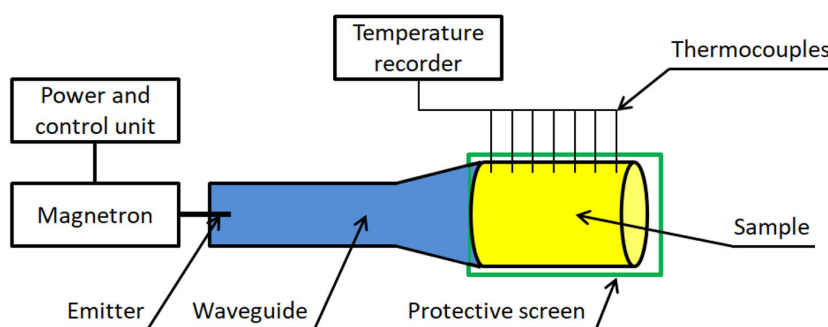


Рис. 1. Схема лабораторной установки для исследования распределения температуры в образце нефтематеринской породы при воздействии микроволновым излучением

Fig. 1. Schematic layout of the laboratory setup for studying the temperature distribution in a source rock sample under microwave irradiation

### Постановка задачи

Рассматривается образец нефтематеринской породы цилиндрической формы длиной  $L$  и диаметром  $D$ . Ввиду радиальной симметрии моделируемой установки расчётная область является двумерной. Её схема приведена на рис. 2. В расчётную область входит только сам образец, как видно по расположению координатной оси. Считается, что он помещается в область воздействия СВЧ электромагнитного поля, под действием которого в среде возникают внутренние распределенные источники тепла.

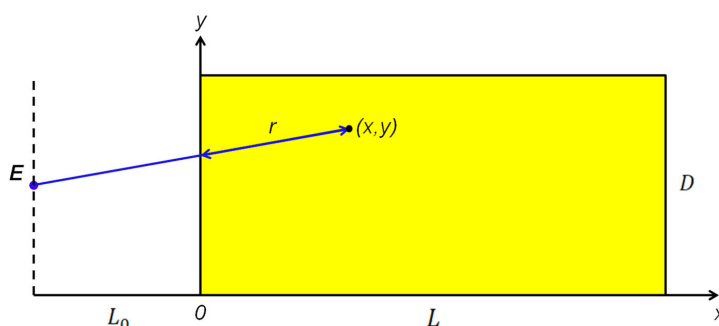


Рис. 2. Схема расчетной области

Fig. 2. Scheme of the computational domain

При построении математической модели насыщенная пористая среда рассматривается как сплошная среда с осредненными значениями физических величин. Рассматривается одностепенная постановка задачи. Источник ЭМП считается точечным и расположенным от образца на расстоянии  $L_0$ , как показано на рис. 2. В первоначальной постановке считается, что физические параметры насыщенной пористой среды, включая диэлектрические, не изменяются в процессе электромагнитного воздействия.

### Математическая модель

Распределение температуры определяется из решения уравнения теплопроводности для насыщенной пористой среды с распределенными источниками тепла [13]:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\lambda}{c\rho} \Delta T + \frac{q}{c\rho} \quad (1)$$

где  $c\rho$  – объемная теплоемкость;  $\lambda$  – коэффициент теплопроводности;  $q$  – плотность распределенных источников тепла.

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

$$T(x, y, t = 0) = T_0 \quad \nabla T|_{\Gamma} = 0, \quad (2)$$

где  $\Gamma$  – граница расчетной области.

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

$$q = 2\alpha P_0 e^{-2\alpha r} \quad (3)$$

$$r = \left(1 - \frac{L_0}{x + L_0}\right) \sqrt{(x + L_0)^2 + \left(y - \frac{D}{2}\right)^2}, \quad (4)$$

где  $\alpha$  – коэффициент поглощения электромагнитной волны;  $P_0$  – плотность потока энергии, излучаемой магнетроном;  $L_0$  – расстояние от источника ЭМП до образца,  $D$  – диаметр образца,  $x$  и  $y$  – координаты расчетной точки,  $r$  – длина проникновения электромагнитной волны в образец, отсчитываемая от точки вхождения до расчетной точки, как показано на рис. 2.

Коэффициент поглощения  $\alpha$  является интегральным параметром, отображающим диэлектрические свойства материала в электромагнитном поле данной частоты:

$$\alpha = \frac{\omega \sqrt{\varepsilon} t g \delta}{2c}, \quad (5)$$

где  $\omega$  – циклическая частота электромагнитного поля,  $\varepsilon$  – диэлектрическая проницаемость,  $t g \delta$  – тангенс угла диэлектрических потерь,  $c$  – скорость света. Его физический смысл заключается в степени поглощения энергии электромагнитной волны при её распространении через среду.

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

$$P_0 = \frac{4P}{\pi D^2}, \quad (6)$$

Табл. 1. Расчетные параметры

Table 1. Modeling parameters

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

Математическая модель была реализована в открытой программной среде FreeFem, ориентированной на решение дифференциальных уравнений в частных производных с использованием метода конечных элементов. Были использованы следующие расчётные параметры.

В первоначальной постановке коэффициент поглощения электромагнитной волны  $\alpha$  был определён валидацией модели экспериментальными данными и составил  $5.8 \text{ м}^{-1}$ . Сопоставление результатов моделирования с экспериментальными данными приведено на рис. 3–4. Зависимость температуры от времени варьируется по координате  $x$ , а от координаты  $x$  – по времени. Маркерами обозначены экспериментальные данные, а линиями соответствующего цвета – результаты моделирования. Цвет маркеров и линий соответствует определённому значению варьируемого параметра.

На рис. 3–4 видно, что расхождение между экспериментальными и численными кривыми тем больше, чем больше значение температуры. Количественное расхождение результатов

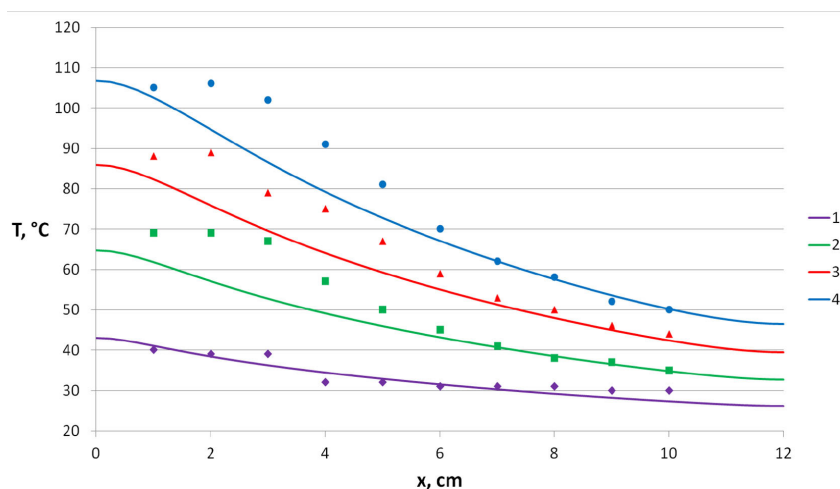


Рис. 3. Распределение температуры по длине образца в разные моменты времени; маркеры – эксперимент, линии – моделирование: 1–60 с, 2–120 с, 3–180 с, 4–240 с;  $\alpha = 5.8 \text{ м}^{-1}$

Fig. 3. Temperature distribution along the length of the sample at different points in time: markers – experiment, lines – modeling; 1–60 s, 2–120 s, 3–180 s, 4–240 s;  $\alpha = 5.8 \text{ м}^{-1}$

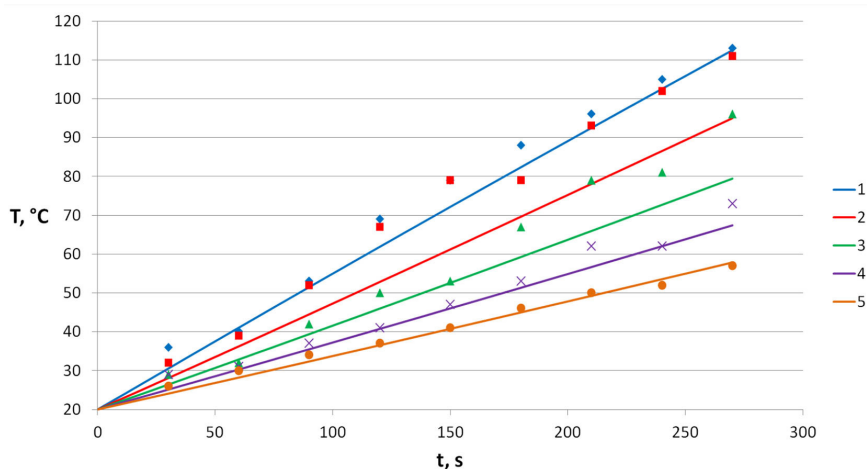


Рис. 4. Динамика температуры на разных участках образца; маркеры – эксперимент, линии – расчёт: 1–1 см, 2–3 см, 3–5 см, 4–7 см, 5–9 см;  $\alpha = 5.8 \text{ м}^{-1}$

Fig. 4. Temperature dynamics in different parts of the sample; markers – experiment, lines – modeling: 1–1 cm, 2–3 cm, 3–5 cm, 4–7 cm, 5–9 cm;  $\alpha = 5.8 \text{ m}^{-1}$

может быть обусловлено тем, что диэлектрическая проницаемость и тангенс угла диэлектрических потерь изменяются в зависимости от температуры. При этом характер этих изменений уникален для всех материалов, их структуры, насыщенности и т.д. Существуют лишь зависимости этих параметров от температуры в определенном диапазоне частот, которые устанавливаются экспериментально для каждого отдельного материала и диапазона частот. В данной постановке коэффициент поглощения  $\alpha$  считается постоянным, что и вызывает значительное расхождение с экспериментом.

Также на основе этой модели было спрогнозировано время достижения образцом температуры  $300 \text{ }^\circ\text{C}$  и глубина проникновения области с температурой выше  $300 \text{ }^\circ\text{C}$  в конечный момент времени. В некоторых породах при этих температурах происходит пиролиз [14]. Расчетная область остается такой же, за исключением увеличения ее длины до 50 см. На рис. 5 представлено распределение температуры по длине образца в разные моменты времени.

Из рис. 5 видно, что тепловой фронт за 1200 с достигает глубины примерно в 35 см, хотя самые высокие температуры наблюдаются лишь до 5–10 см. Область, в которой возможен пиролиз, на этот момент времени составляет около 5 см. Температура  $300 \text{ }^\circ\text{C}$  достигается примерно за 800 с. Это время может быть обозначено как время начала пиролиза в образце.

### Решение обратной задачи

Для увеличения достоверности модели был разработан метод косвенного определения температурной зависимости коэффициента поглощения  $\alpha$  путём решения обратной задачи, суть которого заключается в выражении коэффициента поглощения  $\alpha$  через остальные известные параметры модели.

Формула распределённых источников тепла умножается и делится на  $r$ , и производится замена  $\gamma = 2\alpha r$ :

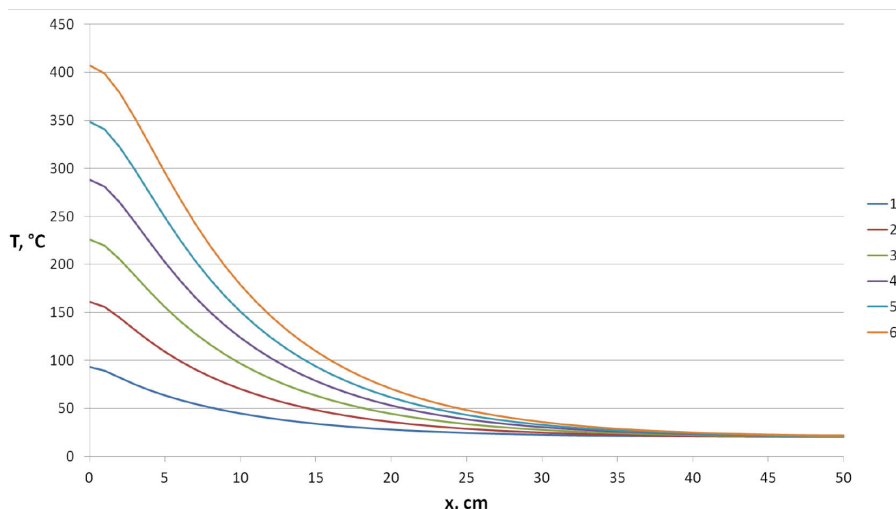


Рис. 5. Прогнозируемое распределение температуры по длине образца в разные моменты времени: 1–200 с, 2–400 с, 3–600 с, 4–800 с, 5–1000 с, 6–1200 с;  $\alpha = 5.8 \text{ м}^{-1}$

Fig. 5. Predicted temperature distribution along the length of the sample at different points in time: 1–200 s, 2–400 s, 3–600 s, 4–800 s, 5–1000 s, 6–1200 s;  $\alpha = 5.8 \text{ m}^{-1}$

$$q = 2\alpha P_0 e^{-2\alpha r} = \frac{P_0 \gamma e^{-\gamma}}{r}. \quad (7)$$

Затем из уравнения теплопроводности выражается  $q$ . Слагаемое  $\lambda \Delta T$  много меньше  $c\rho \frac{\partial T}{\partial t}$ , поэтому им можно пренебречь:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\lambda}{c\rho} \Delta T + \frac{q}{c\rho} \Rightarrow q = c\rho \frac{\partial T}{\partial t} - \lambda \Delta T \simeq c\rho \frac{\partial T}{\partial t}. \quad (8)$$

Производная температуры по времени дискретизируется и рассчитывается по экспериментальным данным:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{T_{i+1} - T_i}{t_{i+1} - t_i}. \quad (9)$$

Два выражения  $q$  приравниваются, и из этого уравнения выражается  $\gamma e^{-\gamma}$ :

$$\gamma e^{-\gamma} = \frac{rc\rho \frac{\partial T}{\partial t}}{P_0}. \quad (10)$$

Обозначим правую часть этого уравнения как  $\Phi$ . Получим следующее уравнение:

$$\gamma e^{-\gamma} = \Phi \Rightarrow \gamma = -W(-\Phi), \quad (11)$$

где  $W$  обозначает функцию Ламберта. Наконец, рассчитываются значения коэффициента поглощения  $\alpha$ :

$$\alpha = \frac{\gamma}{2r}. \quad (12)$$

Полученные значения  $\alpha$  сопоставляются соответствующим средним арифметическим температур, по которым они были рассчитаны. В итоге получается набор точек, который в первом приближении был аппроксимирован экспоненциальной зависимостью:



$$\alpha = 707.71 \cdot e^{-0.014T}. \quad (13)$$

Данные температурной динамики были взяты с самых близлежащих к источнику ЭМП термопар ввиду того, что используемая формула распределённых источников тепла получена с предположением о постоянности и однородности коэффициента поглощения электромагнитной волны  $\alpha$  [15]. Даже если предполагать однородность состава образца, это неверно ввиду неоднородности температурной зависимости,  $\alpha$  от которой мы пытаемся установить. Соответственно, чем дальше от поверхности вхождения ЭМ волны в образец расположена термопара, тем менее валидно применение метода решения обратной задачи для определения её температурной зависимости. В данном случае использование данных с первых двух термопар допустимо, поскольку разница измеренных ими температур остаётся пренебрежимо малой на протяжении всего времени эксперимента.

Математическая модель, в свою очередь, также изменяется для учёта неоднородности коэффициента поглощения:

$$q = 2\alpha(T)P. \quad (14)$$

$$\frac{\partial P}{\partial r} = -q, \quad P(r = 0) = P_0. \quad (15)$$

На рис. 6–7 приведено сопоставление результатов реализации обновлённой модели с экспериментальными данными. Зависимость температуры от времени варьируется по координате  $x$ , а от координаты  $x$  – по времени. Маркерами обозначены экспериментальные данные, а линиями соответствующего цвета – результаты моделирования. Цвет маркеров и линий соответствует определённому значению варьируемого параметра.

На рис. 6–7 видно, что учёт температурной зависимости увеличил степень совпадения результатов моделирования с экспериментальными данными.

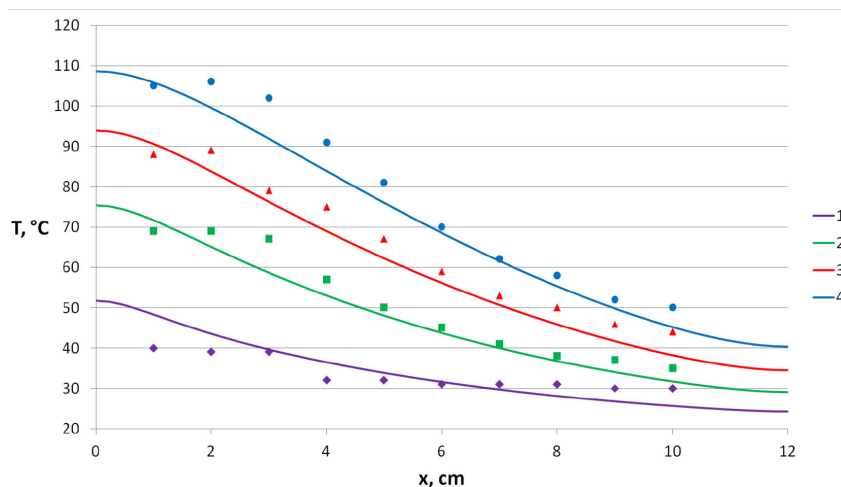


Рис. 6. Распределение температуры по длине образца в разные моменты времени: маркеры – эксперимент, линии – моделирование; 1–60 с, 2–120 с, 3–180 с, 4–240 с;  $\alpha = \alpha(T)$

Fig. 6. Temperature distribution along the length of the sample at different points in time: markers – experiment, lines – modeling; 1–60 s, 2–120 s, 3–180 s, 4–240 s;  $\alpha = \alpha(T)$

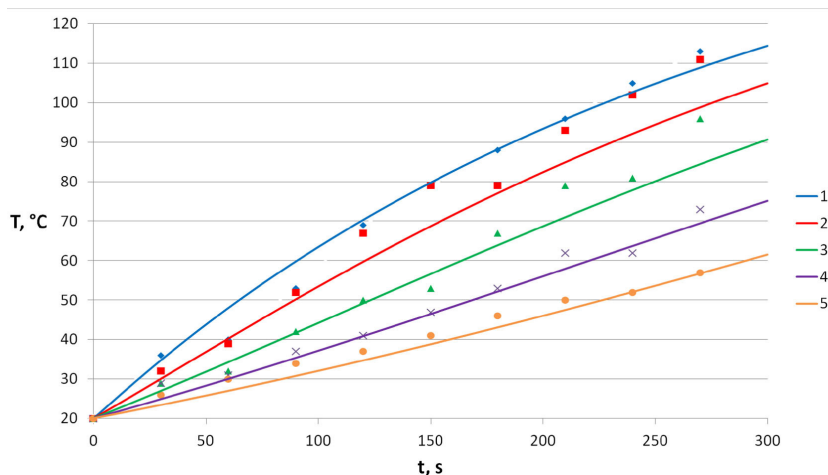


Рис. 7. Динамика температуры на разных участках образца: маркеры – эксперимент, линии – расчёт; 1–1 см, 2–3 см, 3–5 см, 4–7 см, 5–9 см;  $\alpha = \alpha(T)$

Fig. 7. Temperature dynamics in different parts of the sample: markers – experiment, lines – modeling; 1–1 cm, 2–3 cm, 3–5 cm, 4–7 cm, 5–9 cm;  $\alpha = \alpha(T)$

### Заклучение

В результате проведённого исследования показано, что предложенный метод позволяет приемлемо оценить температурную зависимость коэффициента поглощения  $\alpha$ , отображающего диэлектрические параметры среды, находящейся под действием электромагнитного воздействия данной частоты. Ограничением этого метода является отсутствие возможности экстраполяции полученных зависимостей за пределы температурного диапазона, достигнутого в эксперименте. В соответствии с этим для его успешного применения в прогнозировании интенсивности и геометрии электромагнитного нагрева той или иной среды необходимы эксперименты, достигающие более высоких температур.

### Список литературы / References

[1] Sahni A., Kumar M., Knapp R. B. Electromagnetic Heating Methods for Heavy Oil Reservoirs. *Materials of 2000 SPE/AAPG Western Regional Meeting held in Long Beach, California*, 2000.

[2] Бушнев Д. А., Бурдельная Н. С., Деревесникова А. А. Off-line пиролиз керогена доманиковых отложений Тимано-Печорского осадочного бассейна. *Вестник ИГ Коми НЦ УрО РАН*, 2016, № 9–10 С. 3–7 [Bushnev D. A., Burdelnaya N. S., Derevesnikova A. A. Off-line pyrolysis of kerogen from the Domanic deposits of the Timan-Pechora sedimentary basin. *Bulletin of the IG Komi Scientific Center of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences*, 2016, No. 9–10 P. 3–7 (In Rus)]

[3] Winterfeld P.H. et al. Simulation of coupled thermal/hydrological/mechanical phenomena in porous media. *Spe Journal*, 2016, T. 21, № . 03, P. 1041–1049.

[4] Lee K., Moridis G. J., Ehlig-Economides C.A. A Comprehensive Simulation Model of Kerogen Pyrolysis for the In-situ Upgrading of Oil Shales. *SPE J*, 2016, 21, 1612–1630.

[5] Мартемьянов С. М. *Моделирование подземного нагрева горючих сланцев*: автореф. дисс. ... канд. техн. наук: Томск, 2013, 22 с. [Martemyanov S. M. *Modeling of underground heating of oil*

shale: abstract of the dissertation for the degree of candidate of technical sciences: Tomsk, 2013, 22 p. (In Rus)]

[6] Савельев В. В., Саидбеков И. Ч., Сурков В. Г., Мракин А. Н., Головкин А. К. Химический состав газообразных продуктов при термоллизе органического вещества. *Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований*, 2016, № 6–3, С. 459–462.

[7] Zhu J., Yang Z., Li X., Qi S., Fang Q., Ding Y. The experimental study of microwave heating on the microstructure of oil shale samples. *Energy Sci Eng*, 2019, 7, 809–820.

[8] Менжулин М. Г., Соколова Н. В., Шишов А. Н. Наведенная трещиноватость, разупрочнение и разрушение скальных горных пород при СВЧ-нагреве. *Горный информационно-аналитический бюллетень*, 2000, № 8. [Menzhulin M. G., Sokolova N. V., Shishov A. N. Induced fracturing, softening and destruction of rocky rocks during microwave heating. *Mining Information and Analytical Bulletin*, 2000, № 8. (In Rus)]

[9] Вороновский Ю. Д. и др. Разрушение крепких пород в массиве на основе комбинированных электрофизических способов. *Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал)*, 1999, № 3. [Voronovsky Yu. D. et al. Destruction of strong rocks in a massif based on combined electrophysical methods. *Mining information and analytical bulletin (scientific and technical journal)*, 1999, № 3. (In Rus)]

[10] Engin A. E., Tambawala A., Swaminathan M., Bhattacharya S., Pramanik P., Yamazaki K. Frequency-Dependent Dielectric Constant and Loss Tangent Characterization of Thin Dielectrics Using a Rapid Solver. *Proceedings 57th Electronic Components and Technology Conference, Sparks, NV, USA*, 2007, pp. 792–797.

[11] Ковалева Л. А., Зиннатуллин Р. Р., Валеев М. Д. [и др.] Лабораторные исследования нагрева высоковязких нефтей в трубопроводах высокочастотным электромагнитным полем. *Нефтяное хозяйство*, 2019, № 2, С. 82–85. [Kovaleva L. A., Zinnatullin R. R., Valeev M. D. et al. Laboratory investigations of the heating of high-viscosity oil in pipelines by a high frequency electromagnetic field. *OIJ*, 2019, № 2, pp. 82–85 (In Rus)]

[12] Zinnatullin R. R., Sultanguzhin R. F. Studying Dielectric Properties of Oil Shale. *Journal of Physics*. Conference Series. 1675. 012102.

[13] Davletbaev A. Yu., Kovaleva L. A., Nasyrov N. M. An investigation of the processes of heat and mass transfer in a multilayer medium under conditions of injection of a miscible agent with simultaneous electromagnetic stimulation. *High Temperature*, 2009, 47(4), 574–579.

[14] 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. *Вестник Московского университета*, 2015, № 4, С. 34–39. [Bychkov A. Yu., Kalmykov G. A., Bugaev I. A., Kalmykov A. G., Kozlova E. V. Experimental studies of obtaining hydrocarbon fluids from rocks of the Bazhenov formation under hydrothermal impact. *Bulletin of Moscow University*, 2015, № 4, pp. 34–39. (In Rus)]

[15] Abernethy E. R. Production increase of heavy oils by electromagnetic heating. *Journal of Canadian Petroleum Technology*, 1976, vol. 15, issue 03, 91–97.