

Оценка влияния электромагнитных полей на адсорбцию полярных компонентов нефти на поверхности поровых каналов с учетом деформационной поляризации молекул

Хисматуллина Ф.С.^{1,2}, Галимбеков А.Д.³

¹ООО «ЛУКОЙЛ-Инжиниринг», Москва, Россия, ²РГУ нефти и газа (НИУ) им. И.М. Губкина, Москва, Россия,

³Национальный исследовательский университет МЭИ, Москва, Россия
farida.khismatullina@lukoil.com

Аннотация

Тепловой механизм воздействия высокочастотных электромагнитных полей на адсорбционные процессы хорошо изучен, при этом известно, что объемный прогрев среды уменьшает адсорбцию. Представляет интерес изучение других, нетепловых механизмов воздействия высокочастотных электромагнитных полей на адсорбционные процессы. В статье проведена оценка нетеплового воздействия высокочастотных электромагнитных полей на адсорбцию полярных компонентов нефти на неполярном адсорбенте (поверхности поровых каналов). Нетепловое воздействие поля обусловлено эффектами поляризации полярных молекул на поверхности неполярного адсорбента, при этом учитывается ориентационная и деформационная поляризация молекул. Для оценки воздействия рассматривается предельный случай, когда поверхность адсорбента моделируется проводящей металлической поверхностью и на систему воздействует внешнее электростатическое поле. Обобщая полученные результаты оценки на случай высокочастотных электромагнитных полей, для нетеплового воздействия установлено, что поле усиливает адсорбцию полярных молекул на поверхности адсорбента.

Материалы и методы

В статье использовались модели и методы электростатики, описывающие взаимодействия полярных молекул с проводящей поверхностью, а также применялись методы статистической физики для описания адсорбционных процессов.

Ключевые слова

адсорбция, адсорбат, адсорбент, электростатическое поле, полярная молекула, диполь-дипольное взаимодействие

Для цитирования

Хисматуллина Ф.С., Галимбеков А.Д. Оценка влияния электромагнитных полей на адсорбцию полярных компонентов нефти на поверхности поровых каналов с учетом деформационной поляризации молекул // Экспозиция Нефть Газ. 2023. № 7. С. 68–72.

DOI: 10.24412/2076-6785-2023-7-68-72

Поступила в редакцию: 20.11.2023

OIL PRODUCTION

UDC 533.583.2+537.868 | Original Paper

Assessment of the influence of electromagnetic fields on the adsorption of polar components of oil on the surface of pore channels taking into account deformation polarization of molecules

Khismatullina F.S.^{1,2}, Galimbekov A.D.³

¹“LUKOIL-Engineering” LLC, Moscow, Russia, ²Gubkin University, Moscow, Russia, ³National Research University MPEI, Moscow, Russia
farida.khismatullina@lukoil.com

Abstract

The thermal mechanism of the effect of high-frequency electromagnetic fields on adsorption processes is well studied, and it is known that volumetric heating of the medium reduces adsorption. It is of interest to study other, non-thermal mechanisms of influence of high-frequency electromagnetic fields on adsorption processes. In the article the non-thermal effect of high-frequency electromagnetic fields on adsorption of polar components of oil on non-polar adsorbent (surface of pore channels) was evaluated. The non-thermal effect of the field is due to the effects of polarization of polar molecules on the surface of the nonpolar adsorbent, taking into account the orientational and deformation polarization of molecules. To evaluate the effect, we consider the limiting case when the adsorbent surface is modeled as a conducting metallic surface and the system is subjected to an external electrostatic field. Generalizing the obtained evaluation results to the case of high-frequency electromagnetic fields, it is found that the field enhances the adsorption of polar molecules on the adsorbent surface for non-thermal effects.

Materials and methods

The article used models and methods of electrostatics that describe the interactions of polar molecules with a conduction surface, and also used methods of statistical physics to describe adsorption processes.

Keywords

adsorption, adsorbate, adsorbent, electrostatic field, polar molecule, dipole-dipole interaction

For citation

Khismatullina F.S., Galimbekov A.D. Assessment of the influence of electromagnetic fields on the adsorption of polar components of oil on the surface of pore channels taking into account deformation polarization of molecules. Exposition Oil Gas, 2023, issue 7, P. 68–72. (In Russ).

DOI: 10.24412/2076-6785-2023-7-68-72

Received: 20.11.2023

Введение

Известно, что к снижению продуктивности скважин приводит образование адсорбционных слоев из полярных компонентов нефти на поверхности поровых каналов из-за сужения их диаметра. Одним из способов борьбы с отложениями в каналах является воздействие высокочастотным электромагнитным полем [1–9], при котором количество адсорбированных полярных компонентов нефти уменьшается за счет объемного прогрева пласта. Но помимо теплового воздействия существует и другой механизм воздействия — нетепловой, связанный с эффектами поляризации.

В данной работе проведена оценка нетеплового воздействия высокочастотных электромагнитных полей на адсорбционные процессы. Для этого вначале для простоты рассмотрен процесс адсорбции полярных компонентов нефти на неполярном адсорбенте (поверхности поровых каналов) в электростатическом поле, и далее полученные результаты применены для оценки нетеплового механизма воздействия высокочастотных полей.

Основная часть

Вначале рассмотрим адсорбцию без воздействия внешнего электростатического поля. В работе [10] рассмотрен предельный случай адсорбции полярных молекул на неполярном адсорбенте, когда поверхность адсорбента моделируется проводящей металлической поверхностью. В работе [11] рассматривается случай, когда молекула обладает постоянным дипольным моментом и учитывается только ориентационная поляризация. Здесь же, в отличие от этой работы, учитывается и деформационная поляризация, т.е. полярная молекула обладает дипольным моментом \vec{p} , который состоит из двух частей:

$$\vec{p} = \vec{p}_0 + \vec{p}_{def} \quad (1)$$

где \vec{p}_0 — постоянный дипольный момент, обуславливающий ориентационную поляризацию; \vec{p}_{def} — индуцированный дипольный момент молекулы, обуславливающий деформационную поляризацию.

Поверхность представлена как непрерывное проводящее тело, и в нем возникает зеркальное изображение диполя молекулы с противоположным расположением зарядов (рис. 1), что вызывает их притяжение.

Зеркальное изображение диполя создает в точке расположения диполя напряженность поля \vec{E}_{p_0} . Компонента вектора \vec{E}_{p_0} вдоль радиуса вектора \vec{r} $|\vec{r}| = 2z$, где z — расстояние между центром диполя и проводящей поверхностью), проведенного от центра зеркального изображения диполя до центра диполя приводится в работах [12, 13], где описывается формулой:

$$E_{r_{p_0}} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{2p_0 \cos v}{(2z)^3},$$

а компонента, перпендикулярная к \vec{r} , формулой:

$$E_{v_{p_0}} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{p_0 \sin v}{(2z)^3},$$

где ϵ_0 — электрическая постоянная. Тогда вдоль вектора \vec{E}_{p_0} индуцируется дипольный момент, обусловленный деформационной поляризацией, который, зеркально отражаясь, создает в зеркальном изображении индуцированный диполь с противоположным расположением зарядов. В результате индуцированный дипольный момент

\vec{p}_{def} ориентирован вдоль результирующей поля \vec{E}_{p_0} и поля, созданного зеркальным изображением индуцированного диполя $\vec{E}_{p_{def}}$ (рис. 1).

Таким образом, дипольные моменты \vec{p}_0 и \vec{p}_{def} создают результирующее поле \vec{E}_d , имеющее следующие компоненты:

$$E_r = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{2p_0 \cos v}{(2z)^3} + \frac{1}{4\pi} \frac{2\alpha E_r}{(2z)^3},$$

$$E_v = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{p_0 \sin v}{(2z)^3} + \frac{1}{4\pi} \frac{\alpha E_v}{(2z)^3},$$

где учтено, что $\vec{p}_{def} = \epsilon_0 \alpha \vec{E}_d$, α — деформационная поляризуемость молекулы.

После преобразований эти выражения принимают вид:

$$E_r = \frac{1}{1 - \frac{1}{4\pi} \frac{2\alpha}{(2z)^3}} \frac{2p_0 \cos v}{(2z)^3}, \quad (2)$$

$$E_v = \frac{1}{1 - \frac{1}{4\pi} \frac{\alpha}{(2z)^3}} \frac{p_0 \sin v}{(2z)^3}.$$

Энергия диполь-дипольного взаимодействия диполя и его зеркального изображения равна:

$$W = -(\vec{p} \cdot \vec{E}_d),$$

где \vec{p} — дипольный момент полярной молекулы, задаваемый выражением (1), \vec{E}_d — напряженность поля, создаваемая зеркальным изображением диполя полярной молекулы в точке расположения диполя с учетом деформационной поляризации, компоненты которой задаются выражением (2).

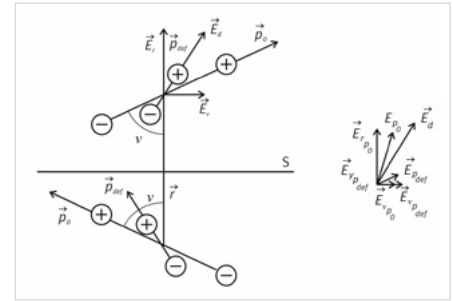


Рис. 1. Расположение диполя и его зеркального изображения относительно поверхности адсорбента: S — поверхность адсорбента

Fig. 1. Location of the dipole and its mirror image relative to the adsorbent surface

Таким образом, энергия диполь-дипольного взаимодействия между полярной молекулой и ее зеркальным изображением равна (рис. 2).

Ориентация диполя на поверхности определяется из минимума энергии диполь-дипольного взаимодействия, которому соответствуют значения угла $v = \pi n$, где $n = 0, 1, 2, \dots$. Таким образом, выражение для минимума этой энергии взаимодействия имеет вид (рис. 3).

Следовательно, диполь ориентируется перпендикулярно поверхности, при этом равновероятны два состояния:

1. Диполь ориентирован к поверхности положительным зарядом;
2. Диполь ориентирован к поверхности отрицательным зарядом.

Константа адсорбционного равновесия Генри в простейшем случае

$$W = -(\vec{p} \cdot \vec{E}_d) = -p_0 E_r \cos v - p_0 E_v \sin v - \alpha (E_r^2 + E_v^2) =$$

$$= -\frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{p_0^2 (1 + \cos^2 v)}{(2z)^3} - \frac{1}{16\pi^2 \epsilon_0} \frac{2\alpha p_0^2}{(2z)^6}$$

$$= -\frac{\left(1 - \frac{1}{4\pi} \frac{2\alpha}{(2z)^3}\right) \left(1 - \frac{1}{4\pi} \frac{\alpha}{(2z)^3}\right) \left(1 - \frac{1}{4\pi} \frac{2\alpha}{(2z)^3}\right) \left(1 - \frac{1}{4\pi} \frac{\alpha}{(2z)^3}\right)}{16\pi^2 \epsilon_0 (2z)^6} \left(4 \cos^2 v \left(1 - \frac{1}{4\pi} \frac{\alpha}{(2z)^3}\right)^2 + \sin^2 v \left(1 - \frac{1}{4\pi} \frac{2\alpha}{(2z)^3}\right)^2\right)$$

$$\left(1 - \frac{1}{4\pi} \frac{2\alpha}{(2z)^3}\right)^2 \left(1 - \frac{1}{4\pi} \frac{\alpha}{(2z)^3}\right)^2$$

Рис. 2. Формула энергии диполь-дипольного взаимодействия между полярной молекулой и ее зеркальным изображением

$$W_{min} = -\frac{1}{2\pi\epsilon_0} \frac{p_0^2}{(2z_0)^3} \left(1 + \frac{1}{4\pi} \frac{\alpha}{(2z_0)^3} \left(1 - \frac{1}{\pi} \frac{\alpha}{(2z_0)^3}\right)\right)$$

$$\left(1 - \frac{1}{2\pi} \frac{\alpha}{(2z_0)^3}\right)^2 \left(1 - \frac{1}{4\pi} \frac{\alpha}{(2z_0)^3}\right)$$

Рис. 3. Формула (3). Минимум энергии диполь-дипольного взаимодействия, где z_0 — равновесное расстояние между центром диполя и поверхностью адсорбента

нелокализованной адсорбции на однородной поверхности приводится в работе [10] и равна:

$$K = \frac{1}{kT} \exp\left(-\frac{W_{min}}{kT}\right), \quad (4)$$

где k – постоянная Больцмана, T – температура.

Для минимума потенциальной энергии (3) диполь-дипольного взаимодействия константа адсорбционного равновесия запишется в виде (рис. 4).

Для случая $\alpha = 0$ выражение для константы адсорбционного равновесия совпадает с выражением, полученным в работе [11], где учитывалась только ориентационная поляризация молекул. Из анализа полученного

выражения (5) следует, что учет деформационной поляризации уточняет значение константы адсорбционного равновесия в большую сторону, т.е. деформационная поляризация усиливает адсорбцию.

Далее рассмотрим случай, когда приложено внешнее электростатическое поле. Как показано в работе [11], при ориентации внешнего поля перпендикулярно поверхности адсорбента влияние поля на адсорбцию максимально.

Пусть вектор напряженности \vec{E} ориентирован от поверхности адсорбента вдоль вектора \vec{E}_r (рис.1), тогда внешнее поле \vec{E} вызовет дополнительную деформационную поляризацию молекулы, равную $p_{defE} = \epsilon_0 \alpha \vec{E}$, зеркальное изображение которого создаст дополнительное электростатическое поле напряженностью:

$$\vec{E}_{de} = \frac{1}{4\pi} \frac{2\alpha \vec{E}}{(2z)^3}. \quad (6)$$

Тогда компоненты \vec{E}_d результирующего поля в точке расположения диполя в этом случае с учетом выражений (2) и (6) запишутся в следующем виде:

$$E_r = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{2p_0 \cos v}{(2z)^3} + \frac{1}{4\pi} \frac{2\alpha E}{(2z)^3} + E + \frac{1}{4\pi} \frac{2\alpha}{(2z)^3} E_r,$$

$$E_v = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{p_0 \sin v}{(2z)^3} + \frac{1}{4\pi} \frac{\alpha E_v}{(2z)^3}.$$

После преобразований эти выражения принимают вид:

$$E_r = \frac{\frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{2p_0 \cos v}{(2z)^3} + \left(1 + \frac{1}{4\pi} \frac{2\alpha}{(2z)^3}\right) E}{1 - \frac{1}{4\pi} \frac{2\alpha}{(2z)^3}},$$

$$E_v = \frac{\frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{p_0 \sin v}{(2z)^3}}{1 - \frac{1}{4\pi} \frac{\alpha}{(2z)^3}}.$$

Тогда энергия диполь-дипольного взаимодействия с учетом внешнего поля равна (рис. 5).

Минимальной энергии диполь-дипольного взаимодействия с учетом внешнего поля соответствуют значения углов $v = 2n\pi$, где $n = 0, 1, 2, \dots$, то есть диполь ориентируется отрицательным зарядом к поверхности. Выражение для минимума энергии примет вид (рис. 6).

Окончательно выражение для константы адсорбционного равновесия Генри (4) в случае перпендикулярной ориентации электростатического поля относительно поверхности адсорбента с учетом минимальной энергии диполь-дипольного взаимодействия (7) имеет следующий вид (рис. 7).

Здесь (рис. 7) K_m – константа адсорбционного равновесия Генри, не зависящая от внешнего электростатического поля. Последнее выражение совпадает с полученным ранее выражением (5), полученным в отсутствие электростатического поля. Отсюда следует, что, согласно (8) (рис. 7), возможно разделение константы адсорбционного равновесия Генри на две не зависящие друг от друга части: не зависящую и зависящую от внешнего поля. Проводя аналогичные расчеты, можно получить выражение для константы адсорбционного равновесия Генри, полностью совпадающее с выражением (8) (рис. 7) для случая, когда вектор напряженности электростатического поля направлен к поверхности адсорбента.

Проанализируем выражение (8) (рис. 7) для константы адсорбционного равновесия Генри. Из (8) (рис. 7) следует, что при перпендикулярной ориентации внешнего электростатического поля относительно поверхности адсорбента константа адсорбционного равновесия Генри всегда возрастает с ростом интенсивности поля, то есть адсорбция полярных молекул при воздействии поля усиливается. Обобщение результатов работы [11], где в том числе рассматривались и параллельная ориентация поля относительно поверхности, но учитывалась только ориентационная поляризация, приводит к общему выводу о том, что внешнее электростатическое поле всегда усиливает адсорбцию.

$$K = \frac{1}{kT} \exp\left(\frac{\frac{1}{2\pi\epsilon_0 kT} \frac{p_0^2}{(2z_0)^3} \left(1 + \frac{1}{4\pi} \frac{\alpha}{(2z_0)^3} \left(1 - \frac{1}{\pi} \frac{\alpha}{(2z_0)^3}\right)\right)}{\left(1 - \frac{1}{2\pi} \frac{\alpha}{(2z_0)^3}\right)^2 \left(1 - \frac{1}{4\pi} \frac{\alpha}{(2z_0)^3}\right)}\right)$$

Рис. 4. Формула 5. Константа адсорбционного равновесия

$$W = -(\vec{p} \cdot \vec{E}_d) = -p_0 E_r \cos v - p_0 E_v \sin v - \epsilon_0 \alpha (E_r^2 + E_v^2) =$$

$$= \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{p_0^2 (1 + \cos^2 v)}{(2z)^3} - \frac{1}{16\pi^2 \epsilon_0} \frac{2\alpha p_0^2}{(2z)^6}$$

$$= \frac{\left(1 - \frac{1}{4\pi} \frac{2\alpha}{(2z)^3}\right) \left(1 - \frac{1}{4\pi} \frac{\alpha}{(2z)^3}\right)}{\left(1 - \frac{1}{4\pi} \frac{2\alpha}{(2z)^3}\right) \left(1 - \frac{1}{4\pi} \frac{\alpha}{(2z)^3}\right)}$$

$$\frac{1}{16\pi^2 \epsilon_0} \frac{\alpha p_0^2}{(2z)^6} \left(4 \cos^2 v \left(1 - \frac{1}{4\pi} \frac{2\alpha}{(2z)^3}\right)^2 + \sin^2 v \left(1 - \frac{1}{4\pi} \frac{2\alpha}{(2z)^3}\right)^2\right)$$

$$\frac{\left(1 - \frac{1}{4\pi} \frac{2\alpha}{(2z)^3}\right)^2 \left(1 - \frac{1}{4\pi} \frac{\alpha}{(2z)^3}\right)^2}{\left(\frac{1 + \frac{2\alpha}{4\pi(2z)^3}}{1 - \frac{2\alpha}{4\pi(2z)^3}}\right)^2} (p_0 E \cos v + \epsilon_0 \alpha E^2)$$

Рис. 5. Энергия диполь-дипольного взаимодействия с учетом внешнего поля

$$W_{min} = -\frac{\frac{2p_0^2}{4\pi\epsilon_0(2z_0)^3} \left(1 + \frac{\alpha}{4\pi(2z_0)^3} \left(1 - \frac{\alpha}{\pi(2z_0)^3}\right)\right)}{\left(1 - \frac{2\alpha}{4\pi(2z_0)^3}\right) \left(1 - \frac{\alpha}{4\pi(2z_0)^3}\right)}$$

$$- \frac{\left(\frac{1 + \frac{2\alpha}{4\pi(2z_0)^3}}{1 - \frac{2\alpha}{4\pi(2z_0)^3}}\right)^2}{\left(1 - \frac{2\alpha}{4\pi(2z_0)^3}\right)} (p_0 E + \epsilon_0 \alpha E^2)$$

Рис. 6. Формула 7. Выражение для минимума энергии, и если можно на страницу 126

Кроме того, в работе [11] было показано, что при перпендикулярной ориентации поля относительно поверхности адсорбента влияние поля на адсорбцию максимально.

В выражении (8) можно выделить два члена, отвечающих за разные механизмы воздействия поля на адсорбцию: линейного (по напряженности поля E , отвечающего за ориентационную поляризацию, и квадратичного (по напряженности поля E^2 , отвечающего за деформационную поляризацию молекул. Здесь следует отметить, что ранее в работе [14], в которой рассматривается феноменологическая теория влияния электромагнитного поля на адсорбцию, для нетеплового механизма воздействия учитывались только квадратичные по напряженности поля члены, хотя, согласно вышеприведенным выводам, необходимо было также учесть и линейные по напряженности поля члены. Из выражения (8) также следует, что константа адсорбционного равновесия Генри в случае отсутствия у молекулы постоянного дипольного момента квадратично возрастает с ростом интенсивности поля, то есть деформационная поляризация молекул выступает как отдельный механизм воздействия на адсорбцию.

Ниже приведена оценка влияния электростатического поля на константу адсорбционного равновесия Генри. Для оценки воздействия электростатического поля на адсорбцию воспользуемся относительной характеристикой воздействия на константу адсорбционного равновесия (рис. 8) где K , K_m — константы адсорбционного равновесия с учетом воздействия поля (8) и без поля (9), соответственно.

В работе [15] приведены значения дипольных моментов молекул асфальтенов,

которые находятся в диапазоне от $1,09 \cdot 10^{-29}$ до $2,28 \cdot 10^{-29}$ Кл·м. Значения деформационной поляризации асфальтенов в данной работе не приведены, поэтому оценивается влияние только дипольных моментов. Таким образом, в случае, когда электростатическое поле ориентировано перпендикулярно поверхности адсорбента, для максимального дипольного момента, равного $p_0 = 2,28 \cdot 10^{-29}$ Кл·м, при температуре $T = 300$ К и напряженности электростатического поля в диапазоне $E = 10^6 - 10^7$ В/м, относительная характеристика равна:

$$\frac{K - K_m}{K_m} = 0,0026 - 0,026,$$

т.е влияние электростатического поля на константу адсорбционного равновесия Генри составляет от 0,26 до 2,6 %.

Итоги

- Внешнее электростатическое поле при любой ориентации относительно поверхности адсорбента усиливает адсорбцию.
- При перпендикулярной ориентации внешнего электростатического поля относительно поверхности адсорбция максимальна.
- Адсорбция зависит от вида поляризации молекул. Так, при поляризации чисто полярных молекул в уравнении для константы адсорбционного равновесия Генри присутствуют только линейные по напряженности поля члены, а для чисто деформационной поляризации присутствуют квадратичные по напряженности поля члены.
- Оценка влияния электростатического поля на адсорбцию асфальтенов для

чисто ориентационной поляризации молекул в предельном случае составляет порядка трех процентов.

Выводы

Обобщая результаты, полученные для электростатического поля на случай высокочастотного электромагнитного поля для нетеплового механизма воздействия, можно сделать следующие выводы:

- независимо от ориентации внешнего электромагнитного поля нетепловой механизм воздействия усиливает адсорбцию полярных молекул на поверхности адсорбента;
- в случае учета только ориентационной поляризации молекул максимальное значение нетеплового эффекта воздействия, оказываемого полем на константу адсорбционного равновесия Генри, мало по сравнению с тепловым эффектом воздействия на адсорбцию.

Литература

1. Bera A., Babadagli T. Effect of native and injected nano-particles on the efficiency of heavy oil recovery by radio frequency electromagnetic heating. Journal of petroleum science and engineering, 2017, Vol. 153, P. 244–256. (In Eng).
2. MacDonald B., Miadonye A. Microwave application in petroleum processing. Ecology, pollution and environmental science, 2018, Vol. 1, issue 1, P. 10–12. (In Eng).
3. Taheri-Shakib J., Shekarifard A., Naderi H. Experimental investigation of the asphaltene deposition in porous media: accounting for the microwave and ultrasonic effects. Journal of petroleum science and engineering, 2018, Vol. 163, P. 453–462. (In Eng).
4. Taheri-Shakib J., Shekarifard A., Naderi H. Experimental investigation of comparing electromagnetic and conventional heating effects on the unconventional oil (heavy oil) properties: Based on heating time and upgrading. Fuel, 2018, Vol. 228, P. 243–253. (In Eng).
5. Wang Z., Gao D., Fang J. Numerical simulation of RF heating heavy oil reservoir based on the coupling between electromagnetic and temperature field. Fuel, 2018, Vol. 220, P. 14–24. (In Eng).
6. Хисматуллина Ф.С., Демид М.С. Исследование воздействия высокочастотного электромагнитного поля и смешивающегося вытеснения на залежи высоковязких нефтей // Нефть. Газ. Новации. 2020. № 2. С. 73–76.
7. Сайтов Р.И., Хасанова А.Ф., Абдеев Р.Г., Абдеев Э.Р., Рукомойников А.А., Швецов М.В. Математическая модель процесса электромагнитного нагрева многофазного многокомпонентного пласта тяжелой нефти // Вестник Академии наук Республики Башкортостан. 2018. Т. 29, № 4. С. 73–79.
8. Ковалева Л.А., Зиннатуллин Р.Р., Султангузин Р.Ф., Габдрафиков А.Ф., Гайнетдинов Э.Ф., Грехов И.В., Тарасевич С.А., Богданов А.В. Лабораторные исследования фазоразделения водонефтяных эмульсий в высокочастотных и сверхвысокочастотных электромагнитных полях // Нефтегазовое дело. 2020. Т. 18. № 4. С. 80–86.

$$K = K_m \exp \left(\left(\frac{\left(1 + \frac{2\alpha}{4\pi(2z_0)^3} \right)^2}{\left(1 - \frac{2\alpha}{4\pi(2z)^3} \right)} \right) \left(\frac{p_0 E}{kT} + \frac{\epsilon_0 \alpha E^2}{kT} \right) \right)$$

где

$$K_m = \frac{1}{kT} \exp \left(\frac{\frac{1}{2\pi\epsilon_0 kT} \frac{p_0^2}{(2z_0)^3} \left(1 + \frac{1}{4\pi} \frac{\alpha}{(2z_0)^3} \left(1 - \frac{1}{\pi} \frac{\alpha}{(2z_0)^3} \right) \right)}{\left(1 - \frac{1}{2\pi} \frac{\alpha}{(2z_0)^3} \right)^2 \left(1 - \frac{1}{4\pi} \frac{\alpha}{(2z_0)^3} \right)} \right)$$

Рис. 7. Формула 8 и 9. Диполь-дипольного взаимодействия

$$\frac{K - K_m}{K_m} = \exp \left(\left(\frac{\left(1 + \frac{2\alpha}{4\pi(2z_0)^3} \right)^2}{\left(1 - \frac{2\alpha}{4\pi(2z_0)^3} \right)} \right) \left(\frac{p_0 E}{kT} + \frac{\epsilon_0 \alpha E^2}{kT} \right) \right) - 1$$

Рис. 8. Относительная характеристика воздействия на константу адсорбционного равновесия

9. Леонтьев А.Ю., Полетаева О.Ю., Бабаев Э.Р., Мамедова П.Ш. Применение СВЧ-воздействия на высоковязкую тяжелую нефть // НефтегазоХимия, 2019. № 2. С. 13–17.
10. Герасимов Я.И. Курс физической химии. Т. 1. М.: Химия, 1964. 624 с.
11. Галимбеков А.Д., Хисматуллина Ф.С. Оценка нетеплового воздействия высокочастотных электромагнитных полей на адсорбционные процессы в пористых средах // Нефтепромысловое дело. 2022. № 8. С. 9–12.
12. Савельев И.В. Курс общей физики. Т. 2. Электричество и магнетизм. СПб.: Лань, 2021. 352 с.
13. Яворский Б.М., Детлаф А.А., Лебедев А.К. Справочник по физике для инженеров и студентов вузов. М.: Мир и образование, 2023. 1056 с.
14. Galimbekov A.D., Kadyrov M.A., Drugov D.A., Muratova G.I., Baizharikova M.A. Investigation of the influence of high frequency electromagnetic fields on sorption processes. Latvian journal of physics and technical sciences, 2019, Vol. 56, issue 1, P. 53–59. (In Eng).
15. Курьяков В.Н. Исследование фазовых превращений в углеводородных флюидах методом статистического и динамического рассеяния света. Диссертация. М.: 2016. 130 с.

ENGLISH

Results

- An external electrostatic field at any orientation relative to the surface of the adsorbent enhances adsorption.
- With the perpendicular orientation of the external electrostatic field relative to the surface, the adsorption is maximal.
- Adsorption depends on the type of polarization of molecules, so when purely polar molecules are polarized, only linear terms in field strength are present in the equation for the Henry adsorption equilibrium constant, and for purely deformation polarization, quadratic terms in field strength are present.
- The evaluation of the effect of the electrostatic field on the adsorption of asphaltenes for purely orientational polarization of molecules in the limiting case is about 3 percent.

References

- Bera A., Babadagli T. Effect of native and injected nano-particles on the efficiency of heavy oil recovery by radio frequency electromagnetic heating. Journal of petroleum science and engineering, 2017, Vol. 153, P. 244–256. (In Eng).
- MacDonald B., Miadonye A. Microwave application in petroleum processing. Ecology, pollution and environmental science, 2018, Vol. 1, issue 1, P. 10–12. (In Eng).
- Taheri-Shakib J., Shekarifard A., Naderi H. Experimental investigation of the asphaltene deposition in porous media: accounting for the microwave and ultrasonic effects. Journal of petroleum science and engineering, 2018, Vol. 163, P. 453–462. (In Eng).
- Taheri-Shakib J., Shekarifard A., Naderi H. Experimental investigation of comparing electromagnetic and conventional heating effects on the unconventional oil (heavy oil) properties: Based on heating time and upgrading. Fuel, 2018, Vol. 228, P. 243–253. (In Eng).
- Wang Z., Gao D., Fang J. Numerical simulation of RF heating heavy oil reservoir based on the coupling between electromagnetic and temperature field. Fuel, 2018, Vol. 220, P. 14–24. (In Eng).
- Khismatullina F.S., Demid M.S. Several aspect while studying the high-frequency electro-magnetic field effect and miscible displacement from heavy oil reservoirs. Neft. Gas. Novatsii, 2020, issue 2, P. 73–76. (In Russ).
- Saitov R.I., Khasanova A.F., Abdeev R.G., Abdeev E.R., Rukomoynikov A.A., Shvetsov M.V. Mathematical model for heating the heavy oil multiphase and multicomponent reservoir with electromagnetic waves. Bulletin of the Academy of sciences of the Republic of Bashkortostan, 2018, Vol. 29, issue 4, P. 73–79. (In Russ).
- Kovaleva L.A., Zinnatullin R.R, Sultanguzhin R.F., Gabdrafikov A.F., Gainetdinov E.F., Grekhov I.V., Tarasevich S.A., Bogdanov A.V. Laboratory studies of water-oil emulsion phase separation in radio-frequency and microwave fields. Petroleum engineering, 2020, Vol.18, issue 4, P.80–86. (In Russ).
- Leontiev A.Yu., Poletaeva O.Yu., Babaev E.R., Mamedova P. Sh. Application of microwave irradiation on extra-heavy crude oil. NeftGazoKhimiya, 2019, issue 2, P. 13–17. (In Russ).
- Gerasimov Ya.I. Course of physical chemistry. Vol. 1. Moscow: Khimiya, 1964, 624 p. (In Russ).
- Galimbekov A.D., Khismatullina F.S. Assessment of the non-thermal effect of high-frequency electromagnetic fields on the adsorption processes in porous media. Oilfield engineering, 2022, issue 8, P. 9–12. (In Russ).
- Savelyev I.V. Course of General Physics. T. 2. Electricity and Magnetism. Saint Petersburg: Lan, 2021. 352 p. (In Russ).
- Yavorsky B.M., Detlaf A.A., Lebedev A.K. Reference book on physics for engineers and students of universities. Moscow: Mir i obrazovanie, 2023, 1056 p. (In Russ).
- Galimbekov A.D., Kadyrov M.A., Drugov D.A., Muratova G.I., Baizharikova M.A. Investigation of the influence of high frequency electromagnetic fields on sorption processes. Latvian journal of physics and technical sciences, 2019, Vol. 56, issue 1, P. 53–59. (In Eng).
- Kuryakov V.N. Investigation of phase transformations in hydrocarbon fluids by the method of statistical and dynamic light scattering. Diss. Moscow: 2016, 130 p. (In Russ).

Conclusions

Summarizing the results obtained for the electrostatic field in the case of a high-frequency electromagnetic field for a non-thermal mechanism of action, the following conclusions can be drawn:

- Regardless of the orientation of the external electromagnetic field, the non-thermal mechanism of action enhances the adsorption of polar molecules on the surface of the adsorbent.
- If only the orientation polarization of the molecules is taken into account, the maximum value of the non-thermal effect of the effect exerted by the field on the adsorption equilibrium constant is small compared to the thermal effect of the effect on adsorption.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ | INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Хисматуллина Фарида Сабигьяровна, к.ф.-м.н., доцент, доцент кафедры (базовой) моделирования физико-технологических процессов разработки месторождений, РГУ нефти и газа (НИУ) им. И.М. Губкина, главный специалист отдела экспертизы и методического обеспечения моделирования разработки ООО «ЛУКОЙЛ-Инжиниринг», Москва, Россия
Для контактов: farida.khismatullina@lukoil.com

Галимбеков Айрат Дамирович, д.ф.-м.н., доцент, профессор кафедры физики имени В.А. Фабриканта Национального исследовательского университета МЭИ, Москва, Россия

Khismatullina Farida Sabigiyarovna, ph.d. of physico-mathematical sciences, associate professor, associate professor of the department (basic) of modeling of physical and technological processes of field development, Gubkin University, Moscow, Russia; chief specialist of the department of expertise and methodological support of development modeling, “LUKOIL-Engineering” LLC, Moscow, Russia
Corresponding author: farida.khismatullina@lukoil.com

Galimbekov Ayrat Damirovich, doctor of physico-mathematical sciences, associate professor, professor of the department of physics named after V.A. Fabrikant of the National research university MEI, Moscow, Russia