

Влияние высокочастотных электромагнитных полей на адсорбционные процессы в пористой среде¹

Ковалева Л.А.^{*,**}, Степанова З.Ю.^{**}, Камалтдинов И.М.^{*,**}, Замула Ю.С.^{*,**}

*Центр «Микро- и наномасштабная динамика дисперсных систем», БашГУ, Уфа,

**Башкирский государственный университет, Уфа

Представлены результаты экспериментального исследования процесса адсорбции полярных углеводородов в насыщенных пористых средах после воздействия высокочастотным электромагнитным (ВЧ ЭМ) полем и, для сравнения, тепловым нагревом. Приведены зависимости извлеченного объема углеводородов из моделей от температуры нагрева среды. При сравнении полученных экспериментальных данных отмечено дополнительное влияние ВЧ ЭМ поля на десорбцию асфальтенов с поверхности пористой среды, что, в свою очередь, ведет к увеличению степени извлечения углеводородов из моделей. В основу теоретического рассмотрения положены термодинамическое обоснование и математическое моделирование процессов теплопереноса в насыщенной среде при ВЧ ЭМ воздействии. В результате исследований установлено, что при воздействии ВЧ ЭМ поля процесс адсорбции замедляется, что положительно сказывается на фильтрационной способности насыщенной породы. При этом учтено, что уравнение кинетики сорбции, основанное на законе Генри, включает слагаемое, отражающее вклад теплового и ЭМ полей. Для выявления механизма адсорбции и десорбции полярных компонентов на поверхности пористой среды под действием ВЧ ЭМ поля проведено исследование влияния поля на процесс адсорбции асфальтенов с помощью атомно-силовой микроскопии (АСМ). По полученным АСМ изображениям отмечено изменение ориентации асфальтенов на подложке в направлении действия поля.

1. Введение

Тепловые и электромагнитные методы нагрева насыщенных углеводородных сред применяются для извлечения высоковязких нефтей и битумов. Фильтрация такой нефти в пористой среде сопровождается некоторым уменьшением расхода. Это явление объясняется образованием на поверхности поровых каналов адсорбционных слоев полярных компонентов нефти, изменяющих молекулярную природу твердой поверхности, и являющихся базой для формирования граничных слоев нефти, вязкость которых на порядок выше вязкости нефти в объеме, а толщина в ряде случаев соизмерима с радиусом поровых каналов. В результате этого явления уменьшается сечение фильтрационных каналов пористой среды и снижаются ее проницаемость и нефтеотдача. При извлечении высоковязких нефтей посредством тепловых методов или же закачки растворителя основной упор делается на разрушение образующегося адсорбционного слоя.

Одним из тепловых методов является ВЧ ЭМ воздействие на призабойную зону пласта (ПЗП), позволяющее проводить направленную, мощную тепловую ее обработку.

Целью данной работы являлось исследование влияния ВЧ ЭМ поля на адсорбционные процессы в насыщенных пористых средах.

2. Экспериментальные исследования

Для определения и оценки ВЧ ЭМ воздействия на процесс адсорбции полярных углеводородов проводились эксперименты, осуществляемые под влиянием ВЧ ЭМ поля и, для сравнения, под действием теплового нагрева. Необходимым условием проведения такого сопоставительного эксперимента являлось соблюдение совершенно одинаковых параметров (физические характеристики моделей, температура ВЧ и теплового нагрева и др.).

2.1. Постановка эксперимента

Модель пористой среды представляла собой пластмассовый стаканчик диаметром 1 см, длиной 10 см, с небольшими отверстиями на дне для отгонки нефти на центрифуге. В качестве наполнителя

¹Работа выполнена при поддержке Министерства образования и науки России (грант 11.G34.31.0040) и РФФИ (грант 11-01-97013).

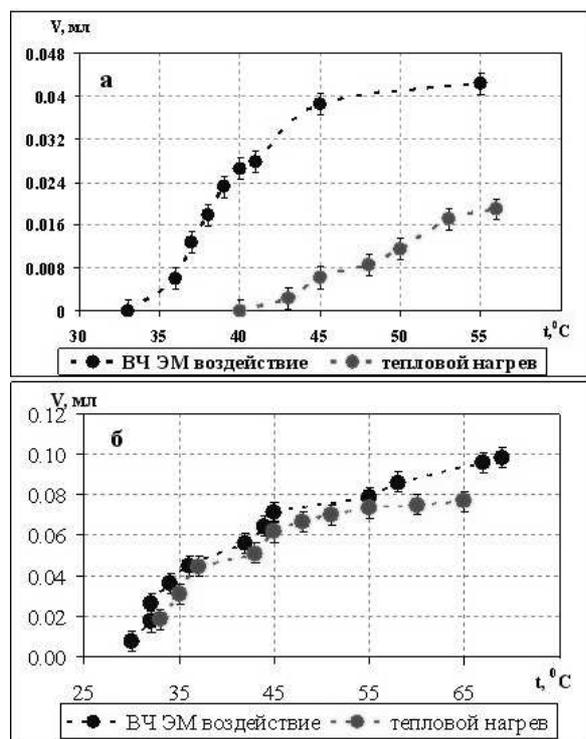


Рис. 1. Зависимость количества вышедшей нефти после ВЧ ЭМ либо теплового воздействия от температуры нагрева для кварцевого песка фракции 0,2 мм (а) и фракции 0,6 мм (б)

модели использован кварцевый песок (фракции 0,2 и 0,6 мм) и силикагель, а в качестве насыщающей жидкости — высоковязкая нефть.

Алгоритм проведения эксперимента состоял в следующем: вначале насыщали образцы нефтью, далее они отстаивались в течение суток для того чтобы все полярные компоненты успели адсорбироваться. Затем образцы помещались в центрифугу для извлечения свободной нефти, содержащейся в моделях. Следующий этап эксперимента, который включал в себя воздействие на пленочную нефть, начинался ВЧ ЭМ или тепловым воздействием на образцы, причем температуры нагрева для двух видов воздействия были одинаковыми. После нагрева до определенной температуры пленочный слой отгонялся из образцов на центрифуге, и измерялось количество вышедшей нефти. Третий этап заключался в воздействии на адсорбированную нефть, который заканчивался полным экстрагированием адсорбированной нефти растворителем и определением количества вышедшей из образцов смеси растворителя и нефти. Количество нефти, вышедшей из образцов, определялось колориметрическим спектрофотометром.

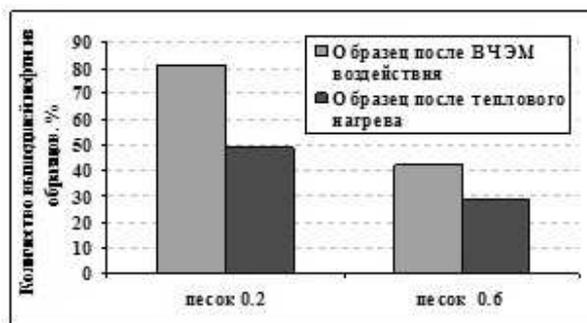


Рис. 2. Количество вышедшей нефти из образцов по отношению к первоначальной насыщенности, %

2.2. Результаты эксперимента

На первом этапе в случае с кварцевым песком фракции 0,2 мм центрифугирование не дало отделения свободной нефти, а из модели с кварцевым песком фракции 0,6 мм выделилось 0,21 мл нефти.

На втором этапе в образцах с кварцевым песком фракции 0,2 мм значение вышедшей пленочной нефти при ВЧ ЭМ воздействии в 2 раза больше количества нефти, вышедшей при тепловом нагреве (рис. 1(а)).

Это означает, что при ВЧ ЭМ воздействии кроме теплового действия проявляются дополнительные (пондеромоторные) силы, которые изменяют структуру нефти. В случае с кварцевым песком фракции 0,6 мм такое количественное различие заметно меньше. Чем меньше диаметр частиц, тем больше удельная поверхность породы и, следовательно, количество адсорбированных частиц больше. Этим и объясняется то, что количество вышедшей нефти больше в тех образцах, где крупнее фракция песка.

На третьем этапе воздействовали на адсорбированный слой, посредством полного экстрагирования растворителем. Можно отметить, что в образцах с кварцевым песком фракции 0,2 мм (рис. 2) вышло значительно больше нефти, чем в образцах с кварцевым песком 0,6 мм (в образцах после ВЧ ЭМ воздействия количество вышедшей нефти больше, чем в образцах после теплового нагрева). Здесь следует, однако, учесть, что у образцов с крупной фракцией песка и само количество адсорбированной нефти было значительно меньше, так как часть ее находилась в свободном состоянии и была отделена на центрифуге.

3. Математическое моделирование

Было проведено также теоретическое исследование влияния ВЧ ЭМП на процессы фильтрации углеводородных систем, содержащих поверхностно-активные компоненты, которые по мере движения в пористой среде адсорбируются на ее поверхности. Для этого произведено математическое моделирование трех вариантов осуществления процесса фильтрации в пористой среде: при воздействии ВЧ ЭМ полем, тепловом прогреве и без внешнего воздействия. Основным уравнением, описывающим рассматриваемые процессы фильтрации в пористой среде, является уравнение конвективной диффузии относительно изменяющейся во времени и пространстве массовой концентрации адсорбирующихся компонентов нефти C в поровом объеме и их концентрации на поверхности породы a (задача одномерная):

$$\frac{\partial a}{\partial t} + m \frac{\partial C}{\partial t} + \nu \frac{\partial C}{\partial x} = D \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} + D(\alpha_T + \alpha_T^E) \frac{\partial^2 T}{\partial x^2}. \quad (1)$$

Здесь m — пористость среды; D — коэффициент диффузии; α_T — параметр термодиффузии; α_T^E — параметр термодиффузии электромагнитного происхождения; T — температура среды.

Скорость фильтрации ν определяется из закона Дарси:

$$\nu = -\frac{k}{\mu} \frac{\partial P}{\partial x}, \quad (2)$$

а распределение давления P и температуры T — из уравнений пьезопроводности и теплопроводности, соответственно:

$$\frac{\partial P}{\partial t} = \frac{k}{m\beta_f + \beta_s} \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{1}{\mu} \frac{\partial P}{\partial x} \right), \quad (3)$$

$$c_m \rho_m \frac{\partial T}{\partial t} = \lambda \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} - \nu c_f \rho_f \frac{\partial T}{\partial x} + Q, \quad (4)$$

в которых λ — коэффициент теплопроводности насыщенной пористой среды; β_f , β_s — коэффициенты сжимаемости соответственно флюида и скелета породы; c_m , ρ_m — коэффициенты удельной теплоемкости и плотности насыщенной пористой среды; k — проницаемость; Q — распределенные источники тепла, возникающие в среде вследствие поглощения энергии ВЧ ЭМП; c_f , ρ_f , μ — соответственно удельная теплоемкость, плотность и динамическая вязкость флюида.

Выражение для распределенных источников тепла в случае ВЧ ЭМ воздействия на среду записывается в виде:

$$Q = \frac{1}{2} \omega \varepsilon_0 \varepsilon' \operatorname{tg} \delta |E|^2, \quad (5)$$

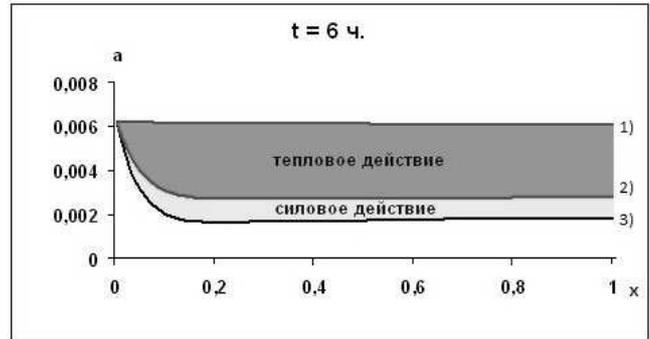


Рис. 3. Распределение концентрации адсорбированной нефти без внешнего воздействия (1), при тепловом прогреве (2) и при воздействии ВЧ ЭМ полем (3) в различные моменты времени

где $\omega = 2\pi f$ — круговая частота ЭМ поля; f — циклическая частота поля; $\operatorname{tg} \delta$ — тангенс угла диэлектрических потерь среды.

Предполагается, что вязкость флюида зависит от температуры и определяется из выражения:

$$\mu = \mu_0 \exp(-\gamma(T - T_0)), \quad (6)$$

где T_0 — первоначальная температура; μ_0 — вязкость флюида при $T = T_0$; γ — температурный коэффициент.

Используем выражение для кинетики сорбции, полученное в работе [5]:

$$\frac{\partial a}{\partial t} = (\beta_m + \beta^{em}) \times \left[c - a \gamma_0^{-1} \exp \left(-\frac{(Q_m + Q^{em})}{R} \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0} \right) \right) \right]. \quad (7)$$

Здесь β_m — константа скорости сорбции; β^{em} — константа скорости сорбции электромагнитного происхождения; γ_0 — постоянная Генри; $Q_m + Q^{em}$ — теплота адсорбции, которая содержит и зависящую от ВЧ ЭМ воздействия часть; R — молярная газовая постоянная.

4. Анализ результатов

На рис. 3 приведено распределение адсорбированной нефти при воздействии ВЧ ЭМ полем, тепловом прогреве и без внешнего воздействия в разные моменты времени. Полученные кривые позволяют наглядно убедиться в эффективности воздействия ВЧ ЭМ полем. Кроме того, воздействие поля повлияло на время начала фильтрации.

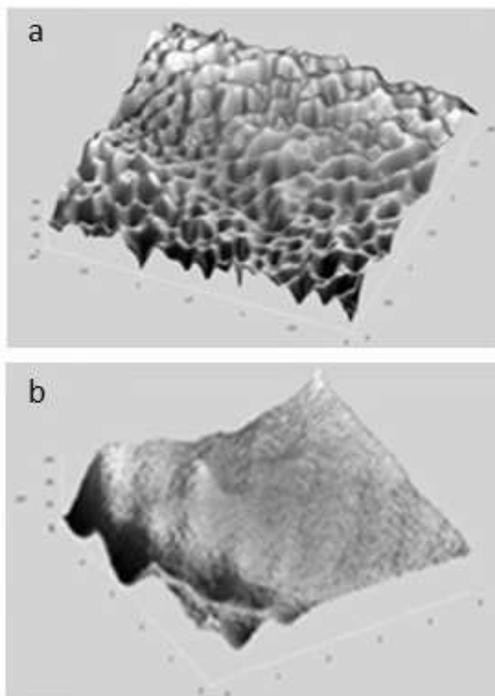


Рис. 4. Изображения агломератов асфальтенов, выделенных из образцов нефти 1, полученные с помощью АСМ до (а) и после ВЧ ЭМ воздействия (б)

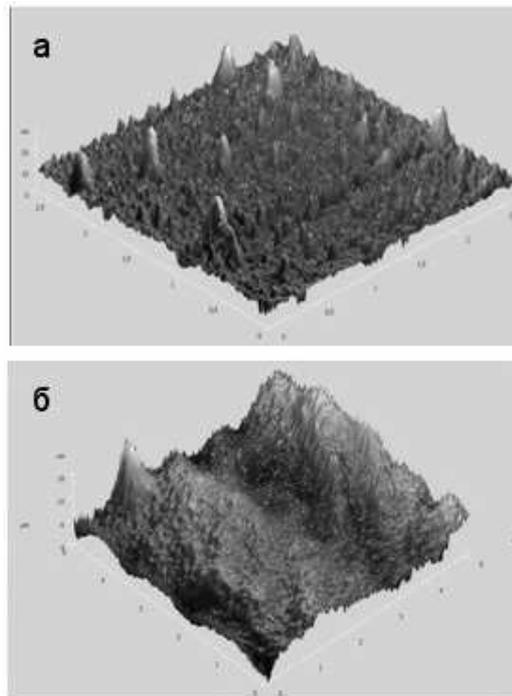


Рис. 5. Изображения агломератов асфальтенов, выделенных из образцов нефти 2, полученные с помощью АСМ до (а) и после ВЧ ЭМ воздействия (б)

5. Исследования полярных компонентов нефти с помощью СЗМ

Экспериментальные исследования влияния ВЧ ЭМ поля на сорбционные процессы в пористых средах дали принципиально важный результат: чем больше адсорбционный слой нефти на поверхности пористой среды (т.е. чем мельче порода), тем значительнее проявляется «нетепловое» действие поля. В некоторой степени это действие проявляется даже на таком сильнейшем адсорбенте как силикагель.

По-видимому, единственным объяснением этому феномену является разрушающее действие поля на полярные компоненты нефти. Особенный интерес представляет изучение влияния поля на адсорбцию асфальтенов, т.к. именно они являются наиболее высокомолекулярными полярными компонентами нефти и обладают повышенной поверхностной активностью. Исследования проводились с применением сканирующей атомно-силовой микроскопии (АСМ) по методике, описанной в работе [7]. При оптимальных условиях данная техника способна к получению изображений, показывающих молекулярное разрешение пленок Ленгмюра–Блоджетта (ЛБ). Для приготовления ЛБ пленок применялись

асфальтены, выделенные из нефтей с месторождений Мортук (нефть 1) и Мешалкинское (нефть 2). В качестве подложки, на которой образовывался монослой из асфальтенов, применялась слюда.

На рис. 4 и 5 показаны изображения агломератов асфальтенов, полученных с помощью АСМ до и после воздействия ВЧ ЭМ поля для нефтей 1 и 2 соответственно.

Изображения, полученные до и после влияния поля, существенно различаются. По изображениям частиц, полученным до обработки поля, можно заметить упакованную структуру асфальтенов на подложке. Причем, в первом случае (рис. 4) отмечается однородная структура слоя, а во втором случае (рис. 5) заметны некоторые пики, что свидетельствует об образовании полимолекулярного слоя асфальтенов на подложке. После воздействия ВЧ ЭМ полем на изображениях можно отметить скопление и некоторую ориентацию частиц. Полярные частицы ориентируются на подложке в направлении действия поля и их размещение на подложке более упорядоченно, чем на изображениях, полученных до воздействия ВЧ ЭМ полем.

6. Заключение

Приведенные в работе результаты экспериментальных и теоретических исследований показали, что по сравнению с тепловым прогревом воздействие ВЧ ЭМП в значительной степени замедляет процесс адсорбции. Это связано с тем, что при ВЧ ЭМ излучении в рабочей среде наряду с распределенными источниками тепла возникает и силовое действие поля (пондеромоторные, термомеханические, термоэлектрические силы и т.д.), которое влияет на процессы образования и разрушения структур полярных компонентов нефти. Воздействие поля улучшает фильтрационные способности породы и флюида, что обусловлено такими процессами, как разрушение адсорбционного слоя, термодиффузия и т.д.

Результаты исследований могут широко использоваться при обосновании принципиально новых наукоемких технологий применения воздействия электромагнитных полей, в частности, в процессах добычи нефти с учетом адсорбционного взаимодействия.

Список литературы

- [1] Нигматуллин Р.И., Саяхов Ф.Л., Ковалева Л.А. Перекрестные явления переноса в дисперсных системах, взаимодействующих с высокочастотным электромагнитным полем // ДАН. 2001. Т. 377, № 3.
- [2] Галимбеков А.Д., Ковалева Л.А. Некоторые аспекты взаимодействия электромагнитных полей с поляризующимися средами. Уфа: РИО БашГУ, 2004.
- [3] Савельев И.В. Курс общей физики: Учеб. Пособие. В 3-х т. Т. 2. Электричество и магнетизм. Волны. Оптика. М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1988. 496 с.
- [4] Ковалева Л.А., Насыров Н.М. Использование численных методов при решении задач высокочастотной электромагнитной гидродинамики. Уфа: РИО БашГУ, 2007. 156 с.
- [5] Галимбеков А.Д. Некоторые аспекты взаимодействия электромагнитных полей с поляризующимися средами: Диссертация на соискание ученой степени доктора физико-математических наук. Уфа, 2007. 208 с.
- [6] Hu Y., Jha K.N., Chakma A. Heavy-Oil Recovery from Thin Pay Zones by Electromagnetic Heating // Energy Sources. 1999. № 21. С. 67–73.
- [7] Eise M.-H., Sjoblom J., Djuve J., Pugh R. An AFM study of asphaltenes on mica surfaces. Influence of added resins and demulsifiers. 2004.