

УДК 622.692

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ НЕФТИ НА НИЗКИХ ЧАСТОТАХ**¹Шайхутдинова М.Ш., ²Гоц С.С., ²Ямалетдинова К.Ш.**¹АО «Транснефть-Урал», Уфа, e-mail: margarita.shajkhutdinova@yandex.ru;²ФГБОУ ВО «Башкирский государственный университет», Уфа

В диапазоне частот от 4 Гц до 1 кГц и в диапазоне температур от 20 °С до 60 °С проведены экспериментальные исследования температурных зависимостей частотных характеристик активной составляющей электропроводности и фазово-частотных характеристик образцов нефти. Показано, что в диапазоне температур 40 °С и ниже электрофизические характеристики исследуемой нефти соответствуют свойствам типичных диэлектриков, а при температурах 50 °С и выше образцы нефти проявляют электрофизические свойства типичных полупроводников. Полученные при различных температурах графики фазово-частотных характеристик отличаются относительно слабой зависимостью фазовых углов от частоты и имеют ярко выраженную температурную зависимость. Наличие множества локальных экстремумов на фазово-частотных характеристиках свидетельствует о существовании поляризационных процессов с различными временами релаксации, распределенными в широком диапазоне значений.

Ключевые слова: электрофизические свойства нефти, импедансная спектроскопия, фазово-частотная характеристика, активная составляющая электропроводности, электропроводность

EXPERIMENTAL STUDIES OF ELECTROPHYSICAL PROPERTIES OF OIL AT LOW FREQUENCIES**Shaykhutdinova M.Sh., Gots S.S., Yamaletdinova K.Sh.**¹Joint Stock Company «Transneft-Ural», Ufa, e-mail: margarita.shajkhutdinova@yandex.ru;²Bashkir State University, Ufa

The experimental investigations measuring temperature dependences amplitude-frequency characteristics of active component complex resistance and phase-frequency characteristics of complex conductivity of oil at low frequencies one of specific oil samples were carry out in the frequency range from 4 Hz to 1 kHz and a temperature range from 20 °C to 60 °C. It is shown that in the temperature from 40 °C and below electro physical characteristics of this oil take to the properties of typical dielectrics, and at temperatures of 50 °C and higher, oil samples have the electro physical properties of typical semiconductors. Taken phase-frequency characteristic has got weak dependence from frequency and has got bright dependence from temperature, which shows existence processes with different times of relaxation in different range of values.

Keywords: electrophysical properties of oil, impedance spectroscopy, the phase-frequency response, active component complex resistance, conductivity

Нефть представляет собой многокомпонентную смесь, состоящую из различных углеводородов, парафинов, асфальтенов, смол, механических примесей и других компонентов [1]. В зависимости от своего физико-химического состава нефть обладает теми или иными свойствами. По своей природе нефть занимает промежуточное положение между диэлектриками и полупроводниками [2]. В настоящее время большое внимание при изучении свойств нефти уделяется импедансной и адмиттансной спектроскопии, суть которой заключается в подаче тестового синусоидального напряжения определенной частоты f на изучаемый образец и регистрации для каждой из устанавливаемых частот f величины и сдвига фазы $\varphi(f)$ тока, проходящего через образец. Исследования электрофизических свойств нефти производятся как на постоянном, так и на переменном токе

в различных диапазонах частот. Ранее были изучены электрофизические свойства асфальтосмолопарафиновых отложений [3–5]. В данной статье представлены результаты экспериментальных исследований фазово-частотных характеристик и частотных характеристик активной компоненты комплексной проводимости нефти с месторождения «Ащисай» на низких частотах в диапазоне температур от 20 °С до 60 °С. Данные исследования основаны на применении универсального метода импедансной (адмиттансной) спектроскопии [6–9], использование которой возможно при работе с различными образцами, в том числе с такими, как нефть, вода, масло и другие. По своим физико-химическим свойствам нефть с месторождения «Ащисай» содержит 19,32 % парафинов, 16,14 % силикагелевых смол и 0,49 % асфальтенов, причём значение плотности при 15 °С составляет

847,1 кг/м³, при 20 °С – 843,5 кг/м³, значение кинематической вязкости уменьшается при увеличении температуры: при 20 °С равна 52,6 мм²/с, при 30 °С – 20,5 мм²/с, при 40 °С – 13,3 мм²/с, при 50 °С 8,4 мм²/с, при 60 °С – 5,2 мм²/с. Следовательно, при увеличении температуры образцов нефти наблюдается уменьшение значения плотности и кинематической вязкости, что можно связать с плавлением парафинов и смол. Можно ожидать, что указанные температурные особенности могут привести и к изменению электрофизических свойств нефти. Целью исследования является проведение измерений температурных зависимостей частотных характеристик активной составляющей электропроводности и фазово-частотных характеристик нефти на низких частотах.

Суть применяемой нами методики измерений заключалась в следующем. Исследуемый образец помещался в диэлектрический контейнер, снабженный плоскостными электродами, выполненными из алюминиевой фольги. Температура в диапазоне от 20 °С до 60 °С поддерживалась за счет применения термостата и измерялась при помощи выносного датчика температуры. Функциональная схема установки изображена на рис. 1.

Суть измерений заключается в следующем. Сигнал, который формирует виртуальный генератор сигналов 1, после усиления в усилителе мощности 2, в виде синусоидального напряжения с частотой f , поступает соответственно на исследуемый образец 3 и эталонный резистор 4. Токи $i_1(t, f)$ и $i_2(t,$

$f)$, соответственно протекающие через 3 и 4, создают на нагрузках 6 напряжения, которые затем поступают соответственно через усилители напряжения 11 и 12 на аналогово-цифровые преобразователи 7 и 8. Цифровые коды с выходов последних вводятся в персональный компьютер и обрабатываются с помощью программы «Двухканальный анализатор сигналов» [10]. Исследования были выполнены при длительной выдержке нефти для каждой температуры с целью установления стабильных электрофизических характеристик.

На рис. 2 и 3 для пяти фиксированных значений температур представлены результаты измерений фазово-частотных характеристик и частотных характеристик активной составляющей электропроводности нефти образца. Представленные графики показывают наличие температурной зависимости на всем диапазоне частот от 4 Гц до 1 кГц. При увеличении температуры от 20 °С до 60 °С на всех исследуемых частотах наблюдается увеличение значений электропроводности образца и одновременное уменьшение фазового сдвига $\varphi(f)$ приблизительно от 90° до 15°. При этом в диапазоне от 40 °С до 60 °С наблюдается значительно большее по абсолютной величине изменение угла сдвига фаз, которое для частоты 4 Гц составляет приблизительно от 77° до 17°. В диапазоне температур от 20 °С до 40 °С для частоты 4 Гц температурные изменения фазовых сдвигов меняются в пределах от 90° угловых градусов до 77°.

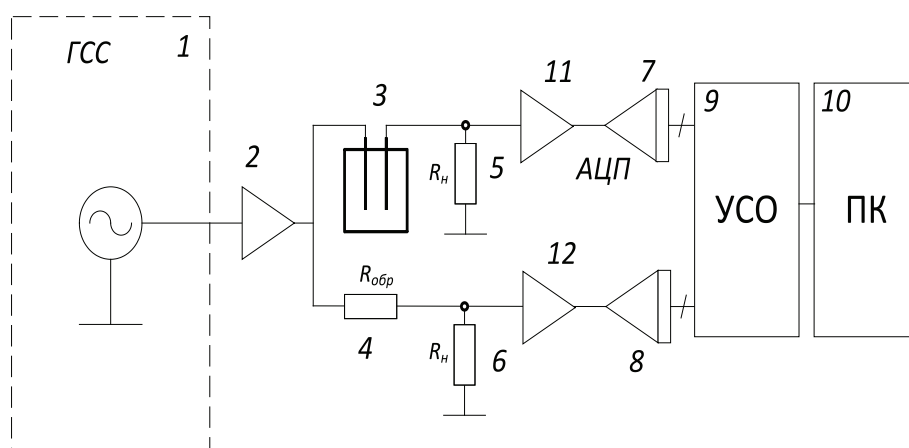


Рис. 1. Функциональная схема лабораторной установки для исследования электрофизических характеристик нефти: 1 – виртуальный генератор сигналов на базе ПК; 2 – усилитель мощности; 3 – измерительная ячейка для образца нефти; 4 – эталонный резистор; 5, 6 – входные нагрузки; 7, 8 – аналогово-цифровой преобразователь (АЦП); 9 – устройство сопряжения с объектами АЦП с ПК; 10 – виртуальный двухканальный анализатор сигналов на базе ПК; 11, 12 – усилители напряжения

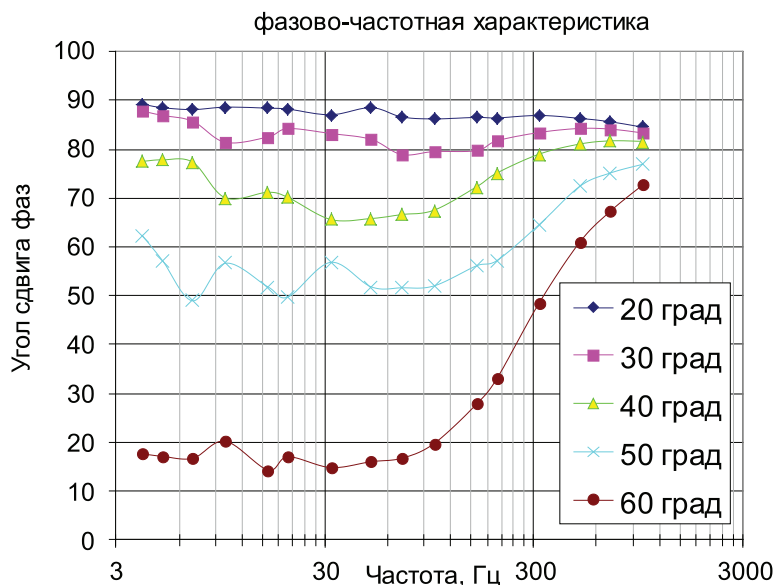


Рис. 2. Фазово-частотные характеристики нефти с месторождения «Ацисай» для пяти фиксированных температур

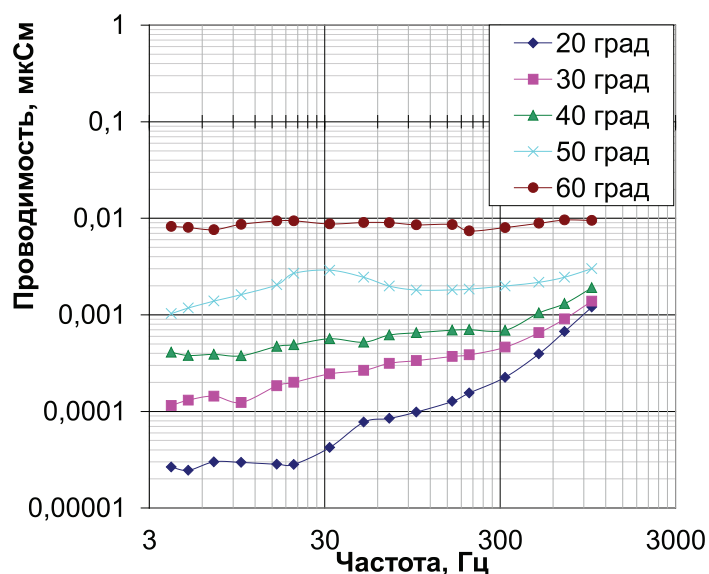


Рис. 3. Частотная характеристика активной составляющей электропроводности нефти с месторождения «Ацисай» для пяти фиксированных температур

Полученные при различных температурах графики фазово-частотных характеристик отличаются относительно слабой зависимостью от частоты фазовых углов сдвига между током и напряжением и имеют ярко выраженную температурную зависимость величин фазовых сдвигов. Наличие множества локальных экстремумов на фазово-частотных характеристиках свидетельствует о существовании поляризационных процессов с различными временами релаксации, распределенными

в широком диапазоне значений. При низких температурах фазовые углы сдвига между током и напряжением составляют около 90° , что характерно для классических диэлектриков. При высоких температурах значения угла сдвига фаз приближаются к 0° , что более характерно для полупроводников и металлов.

Анализируя представленные на рис. 3 графики частотных зависимостей компоненты активной составляющей комплексной электропроводности, можно говорить о моно-

тонном увеличении ее абсолютной величины при увеличении температуры. В отличие от исследованных ранее электрофизических характеристик АСПО [5], на данном графике нет большого разрыва в значениях в диапазонах температур от 20 до 40 °С и от 40 до 60 °С. Тем не менее имеющийся разрыв в значениях углов сдвига фаз при температуре ниже и выше 40 °С свидетельствует о наличии у нефти диэлектрических свойств при температурах ниже 40 °С и проявлении полупроводниковых свойств при температурах выше 40 °С. Указанные изменения мы связываем с тем, что при повышении температуры образцов нефти выше 40 °С происходит плавление твердых парафинов, которые содержатся в сравнительно большом количестве по отношению к другим составляющим в нефти. Кроме того, следует отметить, что различия между значениями активной составляющей электропроводности при изменении температуры выражены значительно больше на частотах меньше 50 Гц. На частотах выше 300 Гц наблюдается существенное сближение активной проводимости при изменении температуры.

Результаты исследований необходимо учитывать при эксплуатации нефтебаз и нефтехранилищ при возможном возникновении электростатических разрядов, связанных с низкой электропроводностью нефти при относительно низких температурах.

Выводы

1. На низких частотах образцы нефти проявляют диэлектрические свойства при температурах ниже 40 °С и полупроводниковые свойства при температурах 50 °С и выше.

2. Наличие множества локальных экстремумов на фазово-частотных характеристиках свидетельствует о существовании поляризационных процессов с временами релаксации, распределенными в широком диапазоне значений.

3. В диапазоне частот от 4 Гц до 1 кГц для каждой фиксированной частоты величина компоненты активной составляющей комплексной электропроводности монотонно возрастает при увеличении температуры. Наиболее сильно указанные изменения выражены на частотах ниже 50 Гц.

Список литературы

1. Вержичинская С.В. Химия и технологии нефти и газа / С.В. Вержичинская, Н.Г. Дигуров, С.А. Синицин. – М.: ФОРУМ: ИНФРА-М, 2007. – 400 с.
2. Кернбах С. Анализ сверхслабых взаимодействий методом электрохимической импедансной спектроскопии // С. Кернбах, И. Куksин, О. Кернбах // Журнал формирующихся направлений науки. – 2016. – № 11(4). – С. 6–22.
3. Шайхутдинова М.Ш. Энергетические характеристики процессов электропроводности асфальтосмолопарафиновых

отложений / М.Ш. Шайхутдинова, С.С. Гоц, К.Ш. Ямалетдинова // Научные технологии в решении проблем нефтегазового комплекса: материалы Межд. молодежной науч. конф. (Уфа, 19–24 дек. 2016 г.). – Уфа: РИЦ БашГУ. – 2016. – С. 79–80.

4. К вопросу об исследовании физико-химического состава асфальтосмолопарафиновых отложений / М.Ш. Шайхутдинова [и др.] // Нефтегазовые технологии и новые материалы. Проблемы и решения: сб. науч. тр. – Уфа: ООО «Монография», 2016. – Вып. 5 (10). – С. 363–366.

5. Шайхутдинова М.Ш. Автоматизированная установка для исследования низкочастотных электрофизических характеристик асфальтосмолопарафиновых отложений / М.Ш. Шайхутдинова, С.С. Гоц, К.Ш. Ямалетдинова // Актуальные проблемы микро- и нанoeлектроники: сборник тезисов докладов IV Всерос. научной молодежной конференции с международным участием (Уфа 29 ноября – 2 декабря 2016 г.). – Уфа: РИЦ БашГУ, 2016. – С. 59–60.

6. Бёккер Ю. Спектроскопия / Ю. Бёккер. – М.: Техноспера, 2009. – 528 с.

7. Goual Lamia. Impedance Spectroscopy of Petroleum Fluids at Low Frequency // Energy & Fuels. – 2009. – vol. 23, issue 4. – P. 2090–2094.

8. Barsoukov E. Impedance spectroscopy: theory, experiment and application / E. Barsoukov, J.R. Macdonald. – N.Y.: Wiley. – 2005. – P. 595.

9. Perini N., Prado A.R., Sad C.M.S., Castro E.V.R., Freitas M.B.J.G. Electrochemical impedance spectroscopy for in situ petroleum analysis and water-in-oil emulsion characterization // Fuel. – 2012. – vol. 91, Issue 1. – P. 224–228.

10. Гоц С.С. Низкочастотный анализатор сигналов в микроэлектронных блоках аппаратуры связи // Лекции и научные статьи Всерос. конф. с элементами научной школы «Приборное и научно-методическое обеспечение исследований и разработок в области микро- и наноэлектроники». – Уфа, 2011. – С. 79–85.

References

1. Verzhichinskaja S.V. Himija i tehnologi nefti i gaza / S.V. Verzhichinskaja, N.G. Digurov, S.A. Sinicin. M.: FORUM: INFRA-M, 2007. 400 p.
2. Kernbah S. Analiz sverhslabyh vzaimodejstvij metodom jelektrohimičeskoj impedansnoj spektroskopii / S. Kernbah, I. Kuksin, O. Kernbah // Zhurnal formirujushihhsja napravlenij nauki. 2016. no. 11(4). pp. 6–22.
3. Shajhutdinova M.Sh. Energetičeskie harakteristiki processov jelektroprovodnosti asfaltosmoloparafinyh otlozhenij / M.Sh. Shajhutdinova, S.S. Goc, K.Sh. Jamaletdinova // Naukoemkie tehnologii v reshenii problem neftegazovogo kompleksa: materialy Mezhd. molodeznoj nauch. konf. (Ufa, 19–24 dek. 2016 g.). Ufa: RIC BashGU. 2016. pp. 79–80.
4. K voprosu ob issledovanii fiziko-himičesko go sostava asfaltosmoloparafinyh otlozhenij / M.Sh. Shajhutdinova [i dr.] // Neftegazovye tehnologii i novye materialy. Problemy i reshenija: sb. nauch. tr. Ufa: OOO «Monografija», 2016. Vyp. 5 (10). pp. 363–366.
5. Shajhutdinova M.Sh. Avtomatizirovannaja ustanovka dlja issledovanija nizkochastotnyh jelektrofizičeskih harakteristik asfaltosmoloparafinyh otlozhenij / M.Sh. Shajhutdinova, S.S. Goc, K.Sh. Jamaletdinova // Aktualnye problemy mikro- i nanojelektroiki: sbornik tezisov dokladov IV Vseross. nauchnoj molodeznoj konferencii s mezhdunarodnym uchastiem (Ufa 29 nojabrja 2 dekabrja 2016 g.). Ufa: RIC BashGU, 2016. pp. 59–60.
6. Bjokker Ju. Spektroskopija / Ju. Bjokker. M.: Tehnosfera, 2009. 528 p.
7. Goual Lamia. Impedance Spectroscopy of Petroleum Fluids at Low Frequency // Energy & Fuels. 2009. vol. 23, issue 4. pp. 2090–2094.
8. Barsoukov E. Impedance spectroscopy: theory, experiment and application / E. Barsoukov, J.R. Macdonald. N.Y.: Wiley. 2005. pp. 595.
9. Perini N., Prado A.R., Sad C.M.S., Castro E.V.R., Freitas M.B.J.G. Electrochemical impedance spectroscopy for in situ petroleum analysis and water-in-oil emulsion characterization // Fuel. 2012. vol. 91, Issue 1. pp. 224–228.
10. Goc S.S. Nizkochastotnyj analizator signalov v mikrojelektroennyh blokah apparatury svjazi // Lekcii i nauchnye stati Vseross. konf. s jelementami nauchnoj shkoly «Pribornoe i nauchno-metodičeskoje obespečenie issledovanij i razrabotok v oblasti mikro i nano jelektroiki». Ufa, 2011. pp. 79–85.