

ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ВЫСОКОМОЛЕКУЛЯРНЫХ УГЛЕВОДОРОДНЫХ ФРАКЦИЙ

© А. М. Петров^{1,2*}, М. Ю. Доломатов^{1,3}, Р. З. Бахгизин¹,
О. Л. Рыжиков¹, И. Р. Хайрудинов²

¹Башкирский государственный университет
Россия, Республика Башкортостан, 450076 г. Уфа, ул. Заки Валиди, 32.

²Институт нефтехимпереработки
Россия, Республика Башкортостан, 450029 г. Уфа, ул. Инициативная, 12.

³Уфимский государственный университет экономики и сервиса
Россия, Республика Башкортостан, 450078 г. Уфа, ул. Чернышевского, 145.

*Email: petrovnanpchemistry@gmail.com

Изучены особенности фазового перехода «диэлектрик-полупроводник» в высококипящих углеводородных фракциях. Температурная зависимость электропроводности высококипящих углеводородных фракций образует излом в области температур 65–85 °С, тангенс угла диэлектрических потерь резко возрастает после достижения 65–85 °С. Активное сопротивление образцов ВУФ снижается при нагревании до 65–85 °С с 0.55 МОм до 0.5 МОм для ВБО и с 0.47 МОм до 0.42 МОм для АПД, а затем резко возрастает до 0.8 МОм, при этом комплексное и реактивное сопротивления продолжают уменьшаться при дальнейшем нагревании. Все эти факты подтверждают гипотезу авторов о том, что в образцах ВУФ в области температур 65–85 °С происходит фазовый переход из состояния «диэлектрик» в состояние «полупроводник». Рост электропроводности в высококипящих углеводородных фракциях обеспечивается температурной генерацией носителей заряда – свободных радикалов (спинов), образующихся в результате разрыва слабых углерод-углеродных связей, ослабленных сопряжением с ароматическими кольцами. Энергии разрыва таких связей достаточно низка и может достигать 40 кДж/моль. Процесс генерации свободных радикалов является обратимым, что подтверждается существованием температурного гистерезиса электропроводности. Данные ЭПР подтверждают наличие генерации стабильных свободных радикалов – с повышением температуры в образцах высококипящих углеводородных фракций увеличивается концентрация парамагнитных центров. Фазовый переход «диэлектрик – полупроводник» также обусловлен генерацией стабильных свободных радикалов, так как они являются сильными акцепторами электронов и снижают ширину запрещенной зоны материала.

Ключевые слова: высококипящие углеводородные фракции, многокомпонентные органические спиновые стекла, диэлектрик, диэлектрическая проницаемость, импеданс, тангенс угла диэлектрических потерь, электропроводность, фазовый переход диэлектрик-полупроводник

Введение

Высококипящие углеводородные фракции (ВУФ), такие как нефтяные битумы, асфальты и другие, широко используются в качестве электроизоляционных компаундов [1]. Знания электрофизических свойств ВУФ и их изменении в ходе эксплуатации имеют большое значение. ВУФ при нормальных условиях проявляют свойства классических диэлектриков: электропроводность ВУФ при нормальных условиях составляет 10^{-14} – 10^{-11} Ом⁻¹·м⁻¹ [2–7]. Однако, электропроводность ВУФ быстро увеличивается с ростом температуры, превышая при 90 °С 10^{-9} Ом⁻¹·м⁻¹ [2–8] и достигая 10^{-7} Ом⁻¹·м⁻¹ при нагреве до 200 °С [6]. Диэлектрическая проницаемость гудронов и битумов лежит в пределах 1.8–3 [9–12], 2.5–3 [8, 13] соответственно. Диэлектрическая проницаемость ВУФ изменяется с ростом температуры [8, 13, 14]. В работе [14] установлено, что диэлектрическая проницаемость битумов в интервале температур 5–100 °С возрастает от 2.5 до 3.3. Аналогичные результаты получены в работе [8] в интервале температур 10–150 °С. В работе [13] отмечено, что диэлектрическая проницаемость битумов, возрастая от 2.66 до 2.69 при нагреве от 60 до 120 °С достигает максимума в области 115–125 °С и при дальнейшем нагреве до 190 °С снижается до 2.64. Подобный характер изменения диэлектрической проницаемости с ростом температуры имеют нефтяные и каменноугольные пеки [8, 15]. Диэлектрическая проницаемость пеков выше, чем диэлектрическая проницаемость гудронов и битумов и может достигать 4–5. В работе [16] исследовалась частотная зависимость тангенса угла диэлектрических потерь гудрона в области

частот 0–250 МГц. Кривая зависимости тангенса угла диэлектрических потерь от частоты имеет нелинейный характер с ярко выраженными изгибами, что интерпретируется авторами работы [16] изменением структуры ВУФ в результате фазовых переходов. Авторами работ [8, 16] установлено, что тангенс угла диэлектрических потерь битумов при различных температурах колеблется в пределах от 0.002 до 0.04. Причем битумы с меньшей температурой размягчения обладают большим тангенсом углом диэлектрических потерь.

Несмотря на многочисленные исследования структуры и свойств ВУФ [2–18], до конца неясными остаются механизмы электронных процессов в таких системах, а экспериментальные данные зачастую являются противоречивыми и несистематизированными.

Цель работы

Целью данной работы является изучение диэлектрических свойств высокомолекулярных углеводородных фракций и их температурных и частотных зависимостей.

Объекты и методы

В качестве высокомолекулярных углеводородных фракций были использованы асфальт пропановой деасфальтизации (АПД) и висбрекинг остаток (ВБО) гудронов западносибирской нефти. Физико-химические свойства образцов приведены в табл. 1.

Методика электрических измерений осуществлялась следующим образом. Образцы помещались в цилиндрическую термостатированную ячейку, выполненную из фторопласта, с двумя плоскими металлическими электродами в дне и крышке ячейки.

Таблица 1
Физико-химические свойства образцов

Свойство	АПД	ВБО
Плотность, кг/м ³	1044	988
Средняя молекулярная масса, г/моль.	878	714
Содержание асфальтенов, % масс.	17.78	18.46
Содержание смол, % масс.	29.42	11.5
Концентрация ПМЦ, спин/г	7.5·10 ¹⁸	5.6·10 ¹⁸
Элементный состав, % масс.		
C	87.00	86.64
H	10.42	9.66
S	1.62	2.15
N	0.37	0.43
O	0.59	1.12

Измерения осуществлялись с помощью программно-аппаратного комплекса NI ELVIS II [19]. Диэлектрическая проницаемость материала рассчитывалась по формуле:

$$\varepsilon = \frac{C_d}{S \varepsilon_0}, \quad (1)$$

где C – емкость ячейки, d – диаметр ячейки, S – площадь сечения ячейки.

Емкость определялась с помощью цифрового мультиметра, входящего в состав комплекса NI ELVIS II.

Частотная характеристика диэлектрической проницаемости определялась следующим образом. Задатчиком параметров переменного напряжения являлся виртуальный прибор, входящий в состав программного обеспечения NI ELVIS II – функциональный генератор сигналов, с помощью аппаратуры комплекса этот сигнал подавался на ячейку с исследуемым материалом. Для измерения силы тока была собрана схема преобразователя ток-напряжение на операционном усилителе с высоким входным сопротивлением и сопротивлением 1 МОм в цепи отрицательной обратной связи. Регистрация входного и выходного напряжения производилась другим виртуальным прибором – осциллографом. Таким образом сопротивление ячейки на данной частоте определялось в мегаомах как отношение входного напряжения к выходному и далее пересчитывалось в емкость.

Данные по импедансу и соотношению активного и реактивного сопротивлений определялись с помощью виртуального инструмента Impedance analyzer, входящего в состав комплекса NI ELVIS на частоте 1000 Гц.

Лабораторная схема измерения регистрации ВАХ также была собрана на базе комплекса NI ELVIS II. Поскольку в аппаратуре данного комплекса отсутствуют средства для измерения низких токов и выработки высоких напряжений, в его схему были добавлены управляемый FLYBACK импульсный усилитель (использовался канал STR0_OUT в режиме управления скважностью) и прецизионные операционные усилители с малыми входными токами и напряжениями смещения. Входная и выходная сила тока регистрировались через аналоговые входы АЮ, АП комплекса NI ELVIS II, программное обеспечение написано на

объектном языке программирования LabVIEW. Нижний предел чувствительности измерительной аппаратуры составил 10⁻¹⁰ А. Электропроводность рассчитывалась по данным ВАХ по формуле:

$$\sigma = \frac{I d}{U S}, \quad (2)$$

где U – напряжение, I – сила тока, S – площадь сечения ячейки, d – расстояние между электродами.

Регистрацию температурных зависимостей измеряемых электрофизических свойств образцов проводили в интервале температур 25–165 °С с шагом 5 °С. После нагрева образца до температуры измерения он выдерживался при этой температуре в течении часа и только после этого производилось измерение. Это было сделано для того, чтобы исключить инерционные эффекты.

Результаты эксперимента

Данные температурной зависимости электропроводности образцов при напряжении 200В приведены в табл. 1.

В интервале температур 25–165 °С наблюдается значительный рост электропроводности образцов на 3 порядка от 10⁻¹⁰ до 7.5·10⁻⁷ Ом⁻¹·м⁻¹.

Для исследованных образцов ВУФ полученные на постоянном токе вольтамперные характеристики имеют ярко выраженный линейный характер при различных температурах (рис. 1, 2).

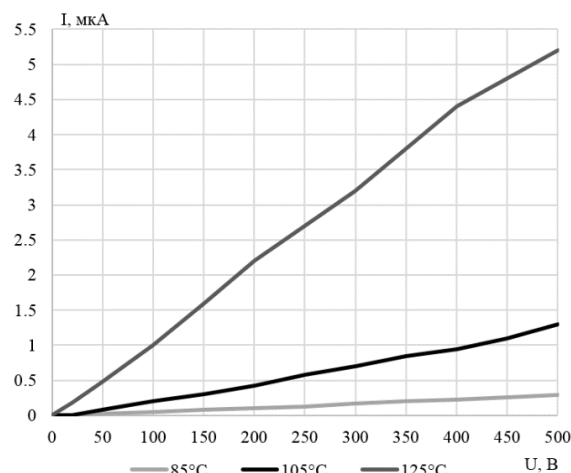


Рис. 1. ВАХ АПД при температурах 85, 105 и 125 °С.

В связи с тем, что измерения ВАХ и электропроводности проводились на постоянном токе, имело место явление поляризационного гистерезиса силы тока между прямой и обратной ветвью ВАХ образцов. Расхождение между значениями прямой и обратной ветвей гистерезиса составляет не более 10% и объясняется образованием двойного электрического слоя между измерительными электродами и исследуемым образцом.

На графике зависимости натурального логарифма электропроводности ВУФ от обратной температуры (рис. 3) наблюдается излом при 65 °С для АПД и при 85 °С для ВБО.

Таблица 2

Электропроводность образцов ВУФ при различных температурах

Образцы	Электропроводность, Ом ⁻¹ ·м ⁻¹							
	25 °С	45 °С	65 °С	85 °С	105 °С	125 °С	145 °С	165 °С
АПД	<10 ⁻¹⁰	2.3·10 ⁻¹⁰	3.0·10 ⁻¹⁰	5.0·10 ⁻⁹	2.1·10 ⁻⁸	1.1·10 ⁻⁷	3.0·10 ⁻⁷	7.5·10 ⁻⁷
ВБО	<10 ⁻¹⁰	1.4·10 ⁻¹⁰	2.0·10 ⁻¹⁰	3.0·10 ⁻¹⁰	2.0·10 ⁻⁹	6.0·10 ⁻⁹	2.7·10 ⁻⁸	7.0·10 ⁻⁸

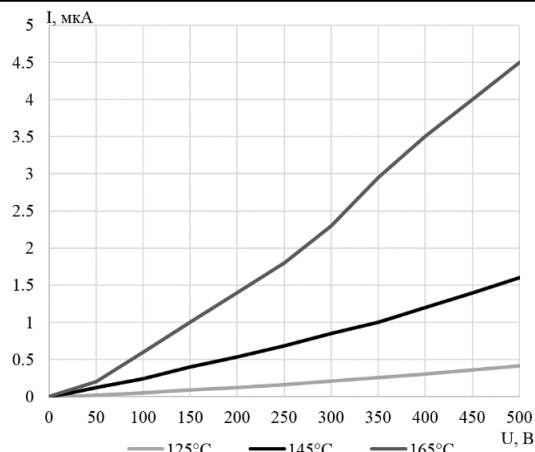


Рис. 2. ВАХ ВБО при температурах 125, 145 и 165 °С.

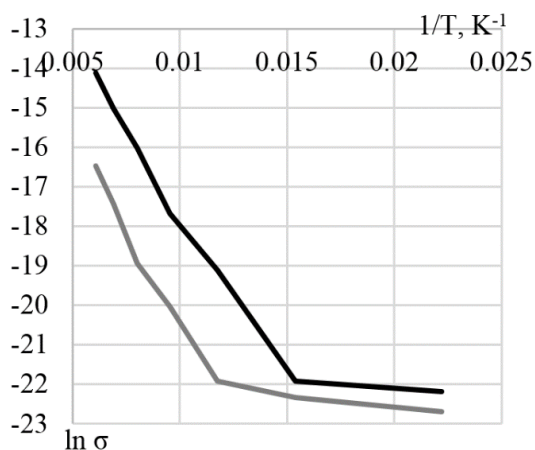


Рис. 3. Зависимость натурального логарифма электропроводности ВУФ от обратной температуры

Диэлектрическая проницаемость образцов ВУФ при нормальных условиях лежит в пределах 2.1–2.2. Температурная характеристика диэлектрической проницаемости при 100 Гц имеет дугообразный характер (рис. 4, 5).

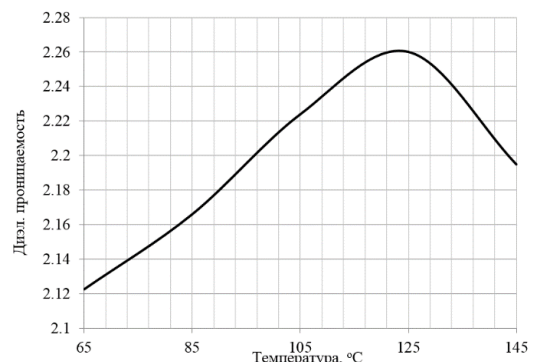


Рис. 4. Температурная зависимость диэлектрической проницаемости АПД

Диэлектрическая проницаемость исследуемых образцов ВУФ возрастает в области температур 60–120 °С и при дальнейшем нагревании выше 125 °С снижается. Полученные результаты совпадают с результатами работы [11].

Комплексное и реактивное сопротивление ВУФ снижается при увеличении температуры синхронно (рис. 6, 7).

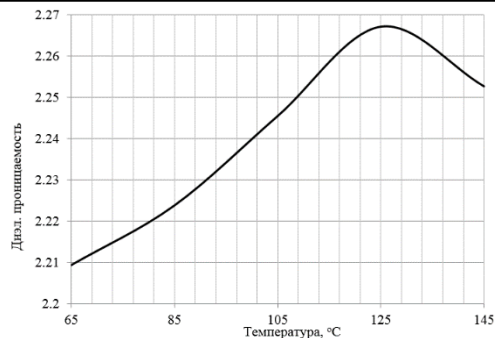


Рис. 5. Температурная зависимость диэлектрической проницаемости ВБО

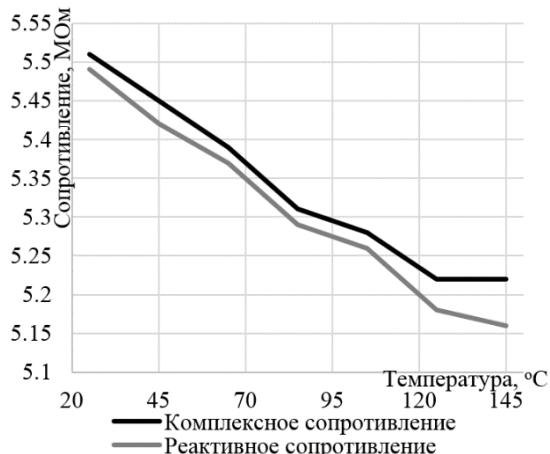


Рис. 6. Изменение комплексного и реактивного сопротивления АПД в интервале температур 25–145 °С.

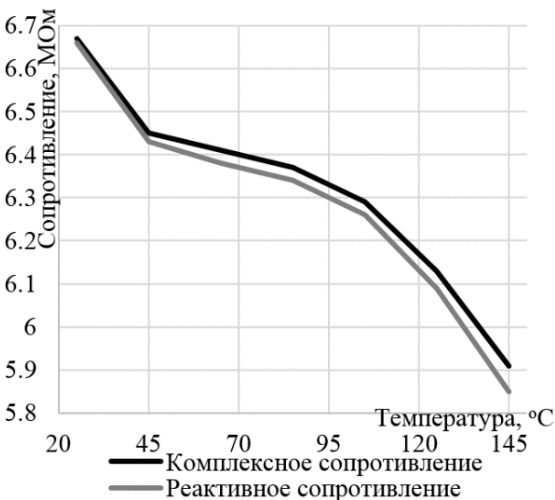


Рис. 7. Изменение комплексного и реактивного сопротивления ВБО в интервале температур 25–145 °С.

В отличие от реактивного и комплексного сопротивлений зависимость активного сопротивления ВУФ от температуры образует минимум в области температур 65–85 °С и в интервале температур 90–145 °С активное сопротивление ВУФ увеличивается в 2 раза (рис. 8).

Тангенс угла диэлектрических потерь ВУФ при комнатной температуре и частоте поля 1000 Гц составляет 0.08–0.09. Температурная зависимость тангенса угла диэлектрических потерь ВУФ образует минимум в области температур 65–85 °С и значительно возрастает при нагреве выше 85 °С, достигая 0.16 при 145 °С (рис. 9).

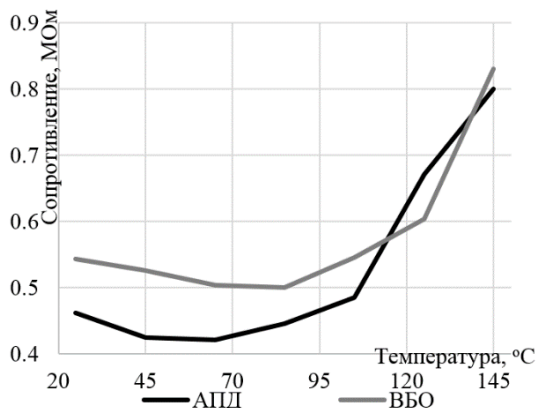


Рис. 8. Изменение активного сопротивления АПД и ВБО в интервале температур 25–145 °С.

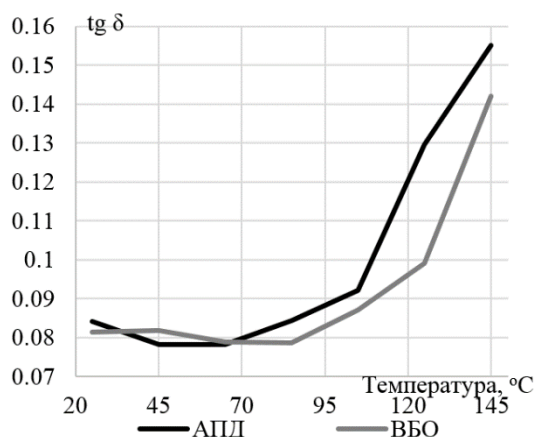


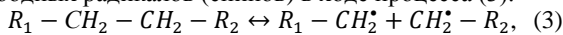
Рис. 9. Изменение тангенса угла диэлектрических потерь АПД и ВБО в интервале температурах 25–145 °С.

Обсуждение результатов

На основе проведенных экспериментов и литературных данных, можно сделать вывод, что высокополиарные углеводородные фракции являются слабополярными метастабильными активными диэлектриками. Их электропроводность резко возрастает с температурой (более чем в 1000 раз на 100 °С).

Температурная зависимость электропроводности ВУФ образует излом в области температур 65–85 °С, тангенс угла диэлектрических потерь резко возрастает после достижения 65–85 °С. Активное сопротивление образцов ВУФ снижается при нагревании до 65–85 °С с 0.55 МОм до 0.5 МОм для ВБО и с 0.47 МОм до 0.42 МОм для АПД, а затем резко возрастает до 0.8 МОм, при этом комплексное и реактивное сопротивления продолжают уменьшаться при дальнейшем нагревании. Все эти факты подтверждают вывод [2–5] о том, что в образцах ВУФ в области температур 65–85 °С происходит фазовый переход из состояния «диэлектрик» в состояние «полупроводник».

В системе происходит температурная генерация свободных радикалов (спинов) в ходе процесса (3):



где R_1 и R_2 – полициклические ароматические фрагменты или бензольные ядра, $R_1 - \dot{C}H_2, \dot{C}H_2 - R_2$ – стабильные свободные радикалы.

Энергии разрыва таких связей достаточно низка и может достигать 40 кДж/моль [17]. Процесс (3) является обратимым, что подтверждается существованием температурного гистерезиса электропроводности [4]. Данные ЭПР показывают [5, 19], что при повышении

температуры от 30 до 160 °С происходит рост парамагнитных центров ВУФ от $6.6 \cdot 10^{18}$ спин/г до $10.6 \cdot 10^{18}$ спин/г. Свободные радикалы снижают ширину запрещенной зоны материала, так как являются сильными акцепторами электронов [20].

Изменения диэлектрической проницаемости ВУФ с ростом температуры вызваны снижением вязкости системы и, как следствие, повышением подвижности межмолекулярных групп, изменением их колебательной частоты и взаимной ориентации. Рост электропроводности при повышении температуры вызван увеличением межмолекулярного расстояния и подвижности структурных групп молекул, что упрощает движение носителей заряда в объеме образцов и снижает энергетический барьер, необходимый для перескока электронов.

Таким образом, фазовый переход электропроводности ВУФ, происходящий в интервале температур 65–85 °С, обеспечивается ростом концентрации носителей заряда в ходе температурной генерации спинов, вызванной разрывом ослабленных сопряжением с ароматическим кольцом углерод-углеродных связей.

ЛИТЕРАТУРА

1. Сорокин В. С. Материалы и элементы электронной техники. Том 1. Проводники, полупроводники, диэлектрики / В. С. Сорокин, Б. Л. Антипов, М. П. Лазарева. Москва: Академия, 2006. 448 с.
2. Доломатов М. Ю. Особенности электропроводности и свойств аморфных полупроводников на основе асфальтенов / М. Ю. Доломатов, С. А. Шуткова, А. Г. Кавыев, Э. А. Юсупов, В. Н. Гордеев, Ю. В. Челноков // Электротехнические и информационные комплексы и системы. 2013. №3. С. 109–114.
3. Доломатов М. Ю. Асфальто-смолистые олигомеры. Применение и физико-химические свойства / М. Ю. Доломатов, С. В. Пестриков, Э. А. Юсупов, С. А. Александрова. Москва: ЦНИИТЭнефтехим. 1992. 70 с.
4. Доломатов, М. Ю. Особенности фазовых переходов «диэлектрик-полупроводник» в многокомпонентных органических спиновых стеклах / М. Ю. Доломатов, А. М. Петров, О. Л. Рыжиков, Р. З. Бахтизин // Электротехнические и информационные комплексы и системы. 2015. №1. С. 117–123.
5. Доломатов, М. Ю. Электрофизические свойства асфальтосодержащих аморфных органических материалов [Текст] / М. Ю. Доломатов, А. М. Петров, О. Л. Рыжиков, Р. З. Бахтизин // Материаловедение. 2015. №2. С. 15–18.
6. Доломатов М. Ю., Петров А. М. Температурные особенности электропроводности многокомпонентных парамагнитных углеводородных систем. / Тез. докл. Международная научно-техническая конференция «Инновации и перспективы сервиса». УГУЭС. 01.12.2014. Уфа: изд-во УГУЭС, 2014. С. 114–115.
7. Руденская, И. М. Состав, структура и физико-механические свойства нефтяных дорожных битумов / И. М. Руденская, А. В. Руденский. // Дороги и мосты. 2009. №2. С. 278–294.
8. Хойберг, А. Д. Битумные материалы. Москва: Химия, 1974. 248 с.
9. Евдокимова Н. Г. Некоторые особенности жидкофазного процесса окисления нефтяных остатков / Н. Г. Евдокимова, М. Ю. Булатникова, Р. Ф. Галиев // Нефтегазовое дело. 2005.
10. Евдокимова Н. Г. Исследование сырья битумного производства диэлектрическими и фотоколориметрическими методами / Н. Г. Евдокимова, Е. В. Грызина, А. А. Гуреев // Башкирский химический журнал. 2012. №2. С. 75–80.
11. Сафиева Р. З. Физикохимия нефти. Физико-химические основы технологии переработки нефти [Текст]: автореф. дис. на соиск. учен. степ. д-ра техн. наук (05.17.07) / Сафиева Рауля Загидулловна; РГУ нефти и газа им. И. М. Губкина. Москва, 1998. 50 с.
12. Сергиенко С. Р., Таимова Б. А., Талалаев Е. И. Высокомолекулярные углеводородные соединения нефти. М: Наука, 1979. 269 с.
13. Субботин И. В. Применение ультразвуковой активации битума на асфальтобетонных заводах / И. В. Субботин // Интернет-журнал «науковедение». 2012. №4. с. 1–9.

14. Saal, R. N. J. Physical constants of asphaltic bitumens Part II // R. N. J. Saal, K. Melmena, P. C. Blokker // Journal of the Institute of Petroleum. 1940. v. 26. p. 246–255.
15. Сб. тр. Научно-технической конференции «Нефть и газ на старте XXI века». Уфа, 22 ноября 2001 года, отделение нефти и газа АН РБ, под. Ред. Бакиева А. В. М.: Химия, 2001. 290 с.
16. Евдокимов И. Н. Особенности электрофизических свойств жидких углеводородных сред с повышенным содержанием смолисто-асфальтеновых веществ / И. Н. Евдокимов, Н. Ю. Елисеев // Химия и технология топлив и масел. 2001. №1. С. 29–31.
17. Унгер Ф. Г., Андреева Л. Н. Фундаментальные аспекты химии нефти. Природа смол и асфальтенов. Новосибирск. Наука, 1995. 192 с.
18. Поконова Ю. В. Химия высокомолекулярных соединений нефти. Ленинград. Изд-во ЛГУ, 1980. 172 с.
19. NI ELVIS II. Руководство пользователя: [Электронный ресурс]. National Instrument, 2008. URL: ftp://ftp.ni.com/pub/branches/russia/ni_elvis/ni_elvis_2_user_guide.pdf (Дата обращения: 20.04.2015).
20. Доломатов, М. Ю. Нефтепромышленная химия. Физико-химические основы направленного подбора растворителей асфальто-смолистых отложений [Текст]: Учеб. Пособие / М. Ю. Доломатов, А. Г. Телин, М. А. Силин. Москва: РГУ нефти и газа имени И. М. Губкина. 2011. 69 с.

Поступила в редакцию 02.02.2015 г.

После доработки – 13.05.2015 г.

ELECTRICAL PROPERTIES OF HIGH-BOILING PETROLEUM FRACTIONS

© A. M. Petrov^{1,2*}, M. Yu. Dolomatov^{1,3}, R. Z. Bakhtizin¹,
O. L. Ryzhikov¹, I. R. Khairudinov²

¹Bashkir State University

32 Zaki Validi St., 450076 Ufa, Republic of Bashkortostan, Russia.

²Institute of Petroleum Refinery and Petrochemistry

12 Inicativnaya St., 450029 Ufa, Republic of Bashkortostan, Russia.

³Ufa State University of Economy and Service

145 Chernyshevsky St., 450078 Ufa, Republic of Bashkortostan, Russia.

*Email: petrovnanpchemistry@gmail.com

The features of the phase transition “dielectric-semiconductor” in the high-boiling hydrocarbon fraction were studied in this paper. The temperature dependences of the electrical conductivity of the high-boiling hydrocarbon fractions has a kink in the temperature range about 65–85 °C, and tangent of the angle of dielectric losses increase after reaching 65–85 °C. The impedance and reactance resistance of the high boiling fractions is decreasing on all temperature range from 25 to 145 °C, but active resistance of the high boiling fractions has been decreasing only to 65 °C and increases after reaching 85 °C. All these facts confirm the author’s hypothesis that there is a phase transition from a state “dielectric” to state “semiconductor” in temperature range 65–85 °C. The increase of the high-temperature hydrocarbon fractions conductivity provide by the generation of charge carriers – free radicals (spin), that are formed by the decoupling of weak carbon-carbon bonds, impaired by conjugation with aromatic rings. The energy gap of such bonds may reach 40 kJ/mol. The process of generating free radicals is invertible, as confirmed by the presence of the temperature hysteresis of conductivity. The existence of a stable free radical generating confirmed by EPR data – when temperature of the high-boiling hydrocarbon fractions samples is increasing, the concentration of the paramagnetic centers is increasing too. Generation of the stable radicals also provides a phase transition “dielectric-semiconductor” because the stable free radicals are strong electron acceptors and they are reducing the band gap of the material.

Keywords: high-boiling hydrocarbon fractions, multicomponent organic spin glasses, dielectric, dielectric permittivity, impedance, tangent of the angle of dielectric losses, conductivity, phase transition dielectric-semiconductor.

Published in Russian. Do not hesitate to contact us at bulletin_bsu@mail.ru if you need translation of the article.

REFERENCES

1. Sorokin V. S. Materialy i elementy elektronnoi tekhniki. Vol. 1. Provodniki, poluprovodniki, dielektriki [Materials and elements of electronic equipment. Volume 1. Conductors, semiconductors, dielectrics] / V. S. Sorokin, B. L. Antipov, M. P. Lazareva. Moscow: Akademiya, 2006.
2. Dolomatov M. Yu. Elek-trotekhnicheskie i informatsionnye komplekсы i si-stemy. 2013. No. 3. Pp. 109–114.
3. Dolomatov M. Yu. Asfal'to-smolistye oligomery. Primenenie i fiziko-khimicheskie svoystva [Asphalt-resinous oligomers. Application and physicochemical properties] / M. Yu. Dolomatov, S. V. Pestrikov, E. A. Yusupov, S. A. Alek-sandrova. Moscow: TsNIITeneftekhimi. 1992.
4. Dolomatov, M. Yu. Elektro-tekhnicheskie i informatsionnye komplekсы i sistemy. 2015. No. 1. Pp. 117–123.
5. Dolomatov, M. Yu. Materialovedenie. 2015. No. 2. Pp. 15–18.
6. Dolomatov M. Yu., Petrov A. M. Temperaturnye oso-bennosti elektroprovodnosti mnogokomponentnykh pa-ramagnitnykh uglevodorodnykh sistem. / Tez. dokl. Mezhdunarodnaya nauchno-tekhnicheskaya konferentsiya «Innovatsii i perspektivy servisa». UGUES. 01.12.2014. Ufa: izd-vo UGUES, 2014. Pp. 114–115.
7. Rudenskaya, I. M. Dorogi i mosty. 2009. No. 2. Pp. 278–294.
8. Khoiberg, A. D. Bitumnye materialy [Bituminous materials]. Moscow: Khimiya, 1974.
9. Evdokimova N. G. Neftegazo-voe delo. 2005.
10. Evdokimova N. G. Bashkirskii khimicheskii zhurnal. 2012. No. 2. Pp. 75–80.
11. Safieva R. Z. Fizikokhimiya nefi. Fiziko-khimicheskie osnovy tekhnologii pererabotki nefi [Tekst]: avto-ref. dis. na soisk. uchen. step. d-ra tekhn. nauk (05.17.07) / Safieva Ravilya Zagidullova; RGU nefi i gaza im. I. M. Gubkina. Moscow: 1998.
12. Sergienko S. R., Taimova B. A., Talalaev E. I. Vysoko-molekulyarnye neuglevodorodnye soedineniya nefi [Non-hydrocarbon high-molecular compounds of oil]. M: Nauka, 1979.
13. Subbotin I. V. Internet-zhurnal «naukovedenie». 2012. No. 4. s. 1–9.
14. Saal, R. N. J. Journal of the Institute of Petroleum. 1940. v. 26. p. 246–255.
15. Sb. tr. Nauchno-tekhnicheskoi konferentsii «Nef' i gaz na starte XXI veka». Ufa, 22 noyabrya 2001 goda, otde-lenie nefi i gaza AN RB, pod. Red. Bakieva A. V. Moscow: Khimiya, 2001.
16. Evdokimov I. N. Khimiya i tekhnologiya top-liv i masel. 2001. No. 1. Pp. 29–31.
17. Unger F. G., Andreeva L. N. Fundamental'nye aspekty khimii nefi. Priroda smol i asfal'tenov [Fundamental aspects of petroleum chemistry. The nature of resins and asphaltenes]. Novosibirsk. Nauka, 1995.
18. Pokonova Yu. V. Khimiya vysokomolekulyarnykh soedineniy nefi [Chemistry of high-molecular compounds of oil]. Leningrad. Izd-vo LGU, 1980.
19. NI ELVIS II. Rukovodstvo pol'zovatelya. National Instrument, 2008. URL: ftp://ftp.ni.com/pub/branches/russia/ni_elvis/ni_elvis_2_user_guide.pdf
20. Dolomatov, M. Yu. Neftpromyslovaya khimiya. Fiziko-khimicheskie osnovy napravlenogo podbora rastvori-telei asfal'to-smolistykh otlozheniy [Tekst]: Ucheb. Posobie / M. Yu. Dolomatov, A. G. Telin, M. A. Silin. Moscow: RGU nefi i gaza imeni I. M. Gubkina. 2011.

Received 02.02.2015.

Revised 13.05.2015.