

УДК 538.9
EDN: XJLSLA

PACS: 81.05.-t

Сопряженные фазовые переходы диамагнетик-парамагнетик и диэлектрик-полупроводник в многокомпонентных аморфных углеводородных средах

М. Ю. Доломатов, С. А. Шуткова, А. А. Родионов, Р. З. Бахтизин,
К. А. Гильманишина

Показано, что высокомолекулярные нефтяные материалы, к которым относятся концентраты смолисто-асфальтовых веществ – битуминозные вещества, асфальты, нефтяные смолы, пеки и т. д. обладают особыми свойствами. Для таких материалов характерны сопряженные фазовые переходы «диэлектрик-полупроводник» и «диамагнетик-парамагнетик» при температурах выше точки размягчения (стеклования). По совокупности магнитоэлектрических и реологических свойств можно предположить, что рассматриваемые системы являются фрустрированными парамагнитными органическими спиновыми стеклами. Результаты эксперимента, проведенного с образцом нефтяного асфальта, являются доказательством подобных эффектов. Данные ЭПР показывают, что при нагревании образца асфальта происходит увеличение концентрации парамагнитных центров с одновременным возрастанием электрической проводимости, что свидетельствует о фазовом переходе «диэлектрик-полупроводник», который сопряжен с ростом количества парамагнитной фазы. Рассчитаны энергия активации проводимости (2,56 эВ) и активации вязкости образца асфальта (0,95 эВ). Подобное изменение электрофизических и магнитных свойств исследуемых материалов свидетельствуют о возможности их применения как материалов с широким диапазоном электропроводящих и магнитных свойств.

Ключевые слова: аморфные нефтяные среды; многокомпонентные парамагнитные органические спиновые стекла; фазовый переход «диэлектрик-полупроводник»; фазовый переход «диамагнетик-парамагнетик».

DOI: 10.51368/2307-4469-2025-13-2-149-156

Введение

Исследования, проведенные в последние годы, свидетельствуют, что материалы с высоким содержанием углерода на основе нефтяных высокомолекулярных фракций, например, нефтяных и каменноугольных смол и пеков, битумов и асфальтов имеют перспективу для микроэлектроники. В отличие от синтетических материалов типа графена и нанотрубок, такие материалы обладают низкой себестоимостью и содержат в своей структуре полициклические ароматические углеводороды (ПАУ), которые являются

структурными элементами графена и графита и имеют полупроводниковые свойства [1–5].

В данной работе объектами исследования являются высокомолекулярные нефтяные системы, содержащие полициклические структуры, к которым относятся смолисто-асфальтовые вещества (САВ). К таким системам относятся концентраты САВ – битуминозные вещества, нефтяные асфальтены и смолы, пеки, содержащие зародыши графеноподобных гексагоновых структур ПАУ.

Отметим, что материалы нефтяного и угольного происхождения являются неупорядоченными парамагнитными многокомпо-

нентными системами с хаосом состава. Такие системы обладают парамагнетизмом [6, 7], магнитная восприимчивость которых достигает величины 10^{-9} – 10^{-5} м³/кг. Считается что парамагнитные центры (ПМЦ) в нефтяных системах локализованы в АСВ. Концентрация ПМЦ в САВ имеет очень высокие значения до 10^{18} – 10^{21} спин/г, что связано с присутствием d-металлов V, Ni, Fe в металлопорфиринах, а также стабильных свободных радикалов [7, 8]. Поэтому следует ожидать, что высокие концентрации ПМЦ будут влиять на электропроводность системы с большим количеством углерода.

С точки зрения теории [7] высококипящие нефтяные системы представляют собой высокомолекулярную парамагнитную фазу из смол и асфальтенов, диспергированную в диамагнитной углеводородной среде. Большинство подобных материалов находятся в стеклообразном состоянии, что, по нашему мнению, позволяет отнести их к многокомпонентным парамагнитным органическим спиновым стеклам. Например, обладающие парамагнетизмом концентраты нефтяных асфальтенов имеют высокие температуры стеклования (от 20 °С до 200 °С).

Из многочисленных исследований известно, что спиновое стекло образуется ниже температуры стеклования (размягчения) из сред с ближним структурным порядком, содержащих магнитные примеси с концентрацией от 0,1 до 10 процентов [10, 11]. В последние годы в физике конденсированного состояния интенсивно исследуются фазовые переходы (ФП) в фрустрированных спиновых стеклах (ФСС). В этих магнетиках минимальная энергия взаимодействующих спинов, достижимая при антипараллельной ориентации спинов, невозможна, вследствие препятствий со стороны аморфной среды и специфических взаимодействий [12]. ФСС метастабильны и характеризуются разнообразием фаз и ФП, что связано с высокой чувствительностью систем к слабым электромагнитным полям, механическим деформациям, квантовым и тепловым флуктуациям, структурным дефектам среды и т. д.

В соответствии с термодинамикой многокомпонентных систем с хаосом химического состава [12], имеем распределение состава по

свободным энергиям образования близкое к нормальному распределению:

$$P = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^2}} \exp\left[-\frac{F_i - \bar{F}}{\sqrt{2\sigma}}\right]^2, \quad (1)$$

где P – вероятность присутствия в аморфной матрице молекул с определенной свободной энергией образования; F_i – свободная энергия образования i -го соединения; \bar{F} – средняя свободная энергия образования всех соединений; σ^2 – соответствующая дисперсия нормального распределения.

Отсюда следует, что среднее макроскопическое свойство среды (\bar{Z}) выражается через распределение (1):

$$\bar{Z} = \int Z(n) P(F) dn. \quad (2)$$

В аморфных нефтяных средах вклад в свободную энергию вносят обменные спиновые взаимодействия. Поэтому в приближении решетки Изинга справедливо выражение:

$$F_s = F_{0s} - 2 \sum J_{lk} (S_k S_l), \quad (3)$$

где F_s – усреднённое по возможным спиновым состояниям значение свободной энергии; F_{0s} – свободная энергия без учета обменного взаимодействия; J_{lk} – обменный интеграл; S_k, S_l – векторы спинов электронов модули, которых равны спиновым квантовым числам.

С учетом (1) и (3) имеем:

$$P_s = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^2}} \exp\left[-\frac{F_{0s} - 2 \sum J_{lk} (S_k S_l) - \bar{F}_s}{\sqrt{2\sigma}}\right]^2. \quad (4)$$

Таким образом, нефтяные материалы имеют большее разнообразие свойств и относятся к сильно фрустрированным спиновым системам, так как согласно (4) количество спиновых состояний в аморфной среде существенно увеличивается. В таблице 1 приведены свойства обычных и многокомпонентных фрустрированных спиновых стекол на нефтяной основе.

Таблица 1

Свойства обычных и многокомпонентных парамагнитных фрустрированных спиновых стекол на нефтяной основе

Свойства	Обычные спиновые стекла	Органические спиновые стекла
Относительная концентрация магнитных частиц	Ферромагнетики в количестве 10^{-3} – 10^{-1}	Парамагнетики в количестве 10^{-3} – 10^{-1}
Состояние	Стеклообразное	Жидкое и стеклообразное
Дальний порядок	Отсутствует	Отсутствует
Электронная проводимость	Имеется	Имеется
d-элементы, обуславливающие магнетизм	Ионы d-элементов металлов	Ионы d-элементов металлов (V, Ni, Fe)
Органические носители парамагнетизма	Отсутствуют	Органические стабильные радикалы
Диаманитная фаза	Неорганическая аморфная	Органическая многокомпонентная аморфная
Зависимость магнитной восприимчивости от температуры	Существует	Существует
Магнитная восприимчивость	> 0	> 0
g-фактор	\approx g-фактору свободного электрона	2,0023–2,0054

В [13, 14] в концентратах асфальтенов и олигомерах на основе гудрона, описан ФП «диэлектрик–полупроводник», заключающийся в росте электропроводности от значений, характерных для диэлектриков, до значений, характерных для полупроводников. Расчеты по методу DFT и 6-31G* и молекулярной динамики указывают на экситонный характер проводимости [15].

Цель работы. Исследование электрофизических свойств САВ и возможности их использования в электротехнике и наноэлектронике.

Объекты исследования. Объектом проведенных исследований является образец асфальта второй ступени пропановой деасфальтизации гудрона западносибирской нефти (АПД), Физико-химические свойства АПД приведены в таблице 2.

Таблица 2

Свойства и состав образца АПД

Свойство	Значение
Относительная плотность	1,046
Усредненная по составу молярная масса, г·моль ⁻¹	880
Количество парамагнетиков, % масс.	45,9
Количество диамагнетиков, % масс.	66,8
Интервал температуры стеклования (размягчения) по методу КиШ, °С	31,2–35,3
Количество ПМЦ по данным ЭПР (298 К), спин/г	$6,29 \times 10^{18}$
Элементный состав, % масс.	
С – 85,90; Н – 9,41; S – 2,64; N – 0,61; O – 0,92, (V + Ni + примеси) – 0,52	
Групповой состав по данным элюэнтной хроматографии, % масс.	
парафины и нафтены	
	7,49
сумма ароматических углеводородов	
	59,61
Количество смолистых веществ	
	14,9
асфальтены	
	18,3

Методика эксперимента

В исследованиях использованы стандартные методы определения физико-химических свойств: плотности (ASTM 1298), среднечисловой молярной массы (криоскопия в нафталине), температуры размягчения (ГОСТ 11506). По данным ИК-спектроскопии определялся групповой состав образца. ИК-спектры регистрировали на спектрометре ФТ-801 с Фурье-преобразованием. Элементный состав определялся методом рентген-флуоресцентного анализа на аппарате PE 2400-II.

Проведены эксперименты по исследованию фазовых переходов «диамагнетик-парамагнетик» и «диэлектрик-полупроводник» с применением метода ЭПР и измерением электрической проводимости образца нефтяного асфальта. Методом ЭПР регистрировались температурные изменения концентрации ПМЦ.

Электропроводность определяли на аппаратно-цифровом комплексе *NI ELVIS II*. Нижний предел чувствительности измерительной аппаратуры составил 10^{-12} А [16].

Концентрации ПМЦ объектов определяли на стационарном спектрометре X-диапазона ESP-300 фирмы Bruker. Для каждого из образцов исследованы температурные зависимости спектров ЭПР в интервале температур 303 – 433 К с шагом 10–20 К и скоростью нагрева 2 К/мин. Концентрация ПМЦ оценивалась из сравнения интегральных интенсивностей спектров исследуемого образца и эталонного образца (раствор *Cu-DETC*) с известной концентрацией ПМЦ.

Измерения динамической вязкости проводили в интервале температур 303–433 К на ротационном вискозиметре *Brookfield DV2*. В исследованиях были использованы стандартные методы определения физико-химических свойств: плотности (ASTM 1298), молекулярной массы (спектроскопия в видимой области), температуры размягчения (ГОСТ 11506). Групповой состав определялся методом элюэнтной хроматографии на аппарате Градиент-М.

Результаты эксперимента

Проведены исследования динамики изменения концентрации парамагнитных центров углеродного типа (ПМЦ) методом ЭПР и со-

ответствующего изменения электрической проводимости с ростом температуры, которые согласуются с ранее проведенными экспериментами на других объектах [17, 18]. Данные ЭПР (табл. 3) свидетельствуют, что при нагревании образца концентрация ПМЦ увеличивается от $6,7 \times 10^{18}$ до $10,8 \times 10^{18}$ спин/г. Электрические измерения показали, что в этом интервале температур также наблюдается возрастание удельной электрической проводимости (от 10^{-11} до 10^{-5} Ом $^{-1}$ ·м $^{-1}$) (табл. 3).

Таблица 3

Взаимосвязь парамагнетизма и электропроводности

Температура, К	Количество ПМЦ, $\times 10^{18}$ спин/г	Электропроводность, (Ом·м) $^{-1}$
303	6,7	$1,24 \times 10^{-11}$
313	7,8	$3,83 \times 10^{-11}$
333	7,9	$3,75 \times 10^{-10}$
343	8,3	$1,22 \times 10^{-9}$
353	8,8	$5,94 \times 10^{-9}$
363	9,5	$1,19 \times 10^{-8}$
373	9,9	$1,49 \times 10^{-7}$
393	10,5	$3,58 \times 10^{-7}$
413	10,6	$2,49 \times 10^{-6}$
433	10,8	$3,45 \times 10^{-5}$

Следовательно, возрастания проводимости и парамагнетизма взаимосвязаны. Иными словами, существует ФП «диэлектрик-полупроводник», который связан с увеличением количества ПМЦ при повышении температуры (табл. 3). В соответствии с теорией [7] последнее означает, что происходит генерация спинов в результате распада метастабильных молекул с образованием свободных радикалов



где M – молекула; R – свободный радикал.

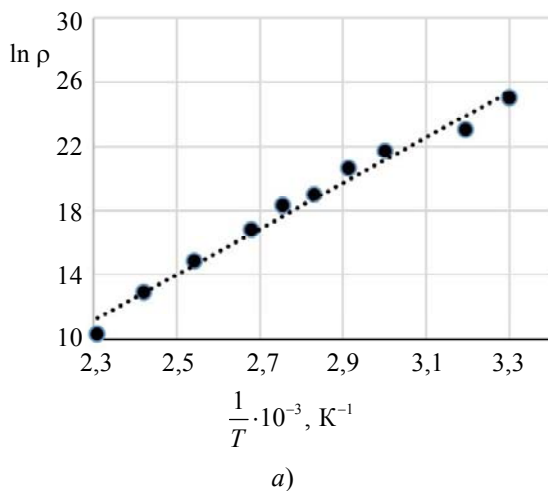
С ростом температуры происходит сдвиг равновесия (5) вправо. При этом происходит не только увеличение концентрации углеродных спинов, но и ФП из стеклообразного аморфного состояния в вязко-текучее, а также ФП диэлектрик-полупроводник. Вероятно, электропроводность возрастает по причине того, что свободные стабильные радикалы являются акцепторами электронов и эквивалентны допирующей добавке р-типа. Важным

доказательством обратимости процессов генерации спинов является температурный гистерезис электропроводности [18].

В предположении прыжкового механизма переноса заряда обработкой экспериментальных данных рассчитана энергия активации проводимости по уравнению аррениусовского типа:

$$\sigma = \sigma_0 e^{-\frac{E_A}{RT}}, \quad (6)$$

где σ_0 – предэкспоненциальный множитель, $\text{Ом}^{-1}\cdot\text{м}^{-1}$; E_A – энергия активации электропроводности, Дж/моль; $R = 8,315 \text{ Дж}/(\text{К}\cdot\text{моль})$ – универсальная газовая постоянная; T – абсолютная температура.



Логарифмическая зависимость удельного сопротивления от температуры показана на рисунке а.

Из реологии жидкой среды известно, что динамическая вязкость связана с временем релаксации системы и описывается уравнением:

$$\eta = \eta_0 e^{-\frac{E_A}{RT}}, \quad (7)$$

где η – динамическая вязкость, Па·с; η_0 – предэкспонента вязкости, Па·с; E_A – энергия активации вязкости, Дж/моль.

Результаты измерения динамической вязкости приведены в таблице 3, логарифмическая зависимость динамической вязкости от температуры показана на рисунке б.

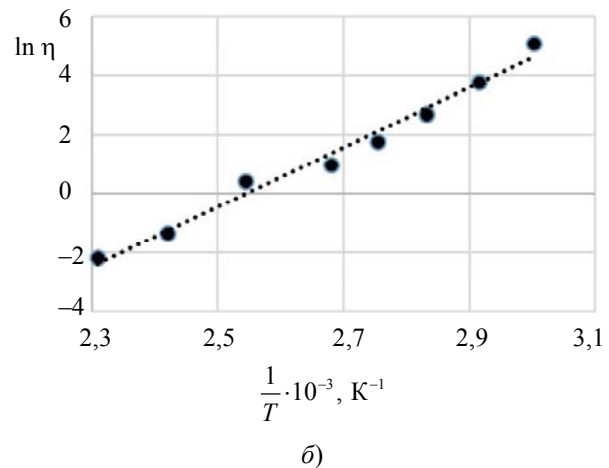


Рис. Температурная зависимость удельного сопротивления (а) и динамической вязкости (б)

Таблица 4

Сопоставление температурной зависимости электропроводности и вязкости образца АПД

Электропроводность			
Температура, К	Электропроводность, $(\text{Ом}\cdot\text{м})^{-1}$	Логарифм предэкспоненты	Энергия активации проводимости, кДж/моль
333	$3,75 \times 10^{-10}$	23,18	246,58 кДж/моль (2,56 эВ)
343	$1,22 \times 10^{-9}$		
353	$5,94 \times 10^{-9}$		
363	$1,19 \times 10^{-8}$		
373	$1,49 \times 10^{-7}$		
393	$3,58 \times 10^{-7}$		
413	$2,49 \times 10^{-6}$		
433	$3,45 \times 10^{-5}$		
Вязкость в текучем состоянии			
Температура, К	Динамическая вязкость, Па·с	Логарифм предэкспоненты	Энергия активации вязкости, кДж/моль
333	158,81	28,31 Температура размягчения (стеклования) по методу КиШ в интервале 298–302 К	91,39 кДж/моль (0,95 эВ)

Энергия активации вязкого течения образца в диапазоне температур менее 473 К равна 0,95 эВ, соответственно энергия активации проводимости составляет 2,56 эВ. Значит, в исследуемых парамагнитных средах с увеличением температуры снижается не только электрическое сопротивление, но и время релаксации, и, как следствие, динамическая вязкость. Отсюда следует, что электропроводность в таких стеклах не связана с переносом заряда, обусловленного движением частиц, а имеет зарядовую электронную природу. Уменьшение вязкости способствует накоплению стабильных свободных радикалов в среде. В отличие от классических спиновых стекол наблюдаются процессы генерации и рекомбинации свободных углеродных радикалов различных типов за счет разрыва слабых углеродных связей. Эти процессы генерации и рекомбинации ПМЦ оказывают значительное влияние на структуру и свойства нефтяных систем, а также на кинетику термических процессов в таких системах. Так как свободные стабильные радикалы являются акцепторами электронов, то они эквивалентны допирующей добавке в асфальтены (полупроводник *p*-типа) и электропроводность возрастает.

Следствием наблюдаемых закономерностей является различная релаксационная природа электропроводности и вязкости многокомпонентных парамагнитных стекол. Это означает, что механизмы переноса импульса и заряда существенно отличаются друг от друга. Таким образом, для парамагнитных фрустрированных многокомпонентных органических стекол характерны сопряженные ФП «диэлектрик–полупроводник» выше точки размягчения (стеклования) и «диамагнетик–парамагнетик». Эти процессы связаны с усилением процесса генерации спинов за счет термического распада соединений со слабыми углеродными связями в многокомпонентной среде.

На основании вышеизложенного можно заключить, что нефтяные системы являются фрустрированными спиновыми парамагнитными органическими стеклами. Эти процессы связаны с усилением процесса термического распада метастабильных соединений и генерацией стабильных свободных радикалов в многокомпонентной среде. Обнаруженные эффекты позволяют разработать новые терморезистивные материалы на новой основе [19].

Заключение

Показано, что аморфные многокомпонентные парамагнитные системы из большого количества разнообразных органических соединений могут быть отнесены к фрустрированным многокомпонентным органическим парамагнитным спиновым стеклам. Установлено, что для САВ характерны сопряженные фазовые переходы «диэлектрик–полупроводник» и «диамагнетик–парамагнетик» при температурах выше температуры стеклования. Значительное увеличение электропроводности свидетельствует о развитии ФП «диэлектрик–полупроводник», который связан с ростом количества парамагнитной фазы. Обратимость ФП в САВ подтверждает температурный гистерезис электропроводности.

Результаты исследований электрофизических свойств САВ подтверждают возможность использования асфальтенов и их концентратов в электротехнике и наноэлектронике.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Zang X., Dong Y., Jian C. et al. / Matter. 2022. Vol. 5. № 2. P. 430–447.
2. Gonzalez D., Montes-Moran M. A., Garcia A. B. / Energy and Fuels. 2003. Vol. 17. P. 1324–1329.
3. Keller B. D., Ferralis N., Grossman J. C. / Nano Lett. 2016. Vol. 16. P. 2951–2957.
4. Dolomatov M. Yu., Petrov A. M., Bakhtizin R. Z. et al. / IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. 2017. Vol. 195. P. 29–32.
5. Dolomatov M. Yu., Desortsev S. V., Shutkova S. A. / Journal of Materials Science and Engineering. 2012. Vol. 2. № 2. P. 151–157.
6. Гарифьянов Н. С., Козырев Б. М. / ЖЭТФ. 1956. Т. 30. № 2. С. 272–276.
7. Унгер Ф. Г., Андреева Л. Н. Фундаментальные аспекты химии нефти. Природа смол и асфальтенов. – Новосибирск: Наука, 1995.
8. Yen T., Chilingarian G. Asphaltenes and asphalts. Developments in petroleum science. – New York: Elsevier, 1994.
9. Diep H. T. / Journal of Science: Advanced Materials and Devices. 2016. P. 31–44.
10. Tisser M., Delamotte B., Mouhanna D. / Physical Review Letters. 2000. Vol. 84. № 22. P. 5208–5211.
11. Доценко В. С. / УФН. 1995. Т. 165. № 5. С. 481–528.
12. Долوماتов М. Ю. Фрагменты теории реального вещества. – М.: Химия, 2005.
13. Dolomatov M. Yu., Rodionov A. A., Petrov A. M., Gafurov M. R., Orlinskii S. B., Biktagirov T. B.,

Makarchikov S. O. / Magnetic Resonance in Solids. 2016. № 1. P. 1–7.

14. *Dolomatov M. Yu., Gafurov M. R., Rodionov A. A. et al.* / IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science. 2018. Vol. 155. P. 82–90.

15. *Доломатов М. Ю., Шуткова С. А., Бахтизин Р. З., Доломатова М. М., Латыпов К. Ф., Гильманшина К. А., Бадретдинов Б. Р.* / Нефтехимия. 2020. Т. 60. № 1. С. 20–25.

16. *Рыжиков О. Л., Сафаргаллин И. Н., Петров А. М., Доломатов М. Ю.* Автоматизированный измерительный комплекс электрофизических свойств

высокоомных материалов. Полезная модель. Патент на изобретение № 154974 (РФ). 2015.

17. *Доломатов М. Ю., Шуткова С. А., Кавыев А. Г. и др.* / Электротехнические и информационные комплексы и системы. 2013. № 3. С. 109–114.

18. *Dolomatov M. Yu., Petrov A. M., Bakhtizin R. Z. et al.* / Inorganic materials: applied research. 2016. № 7. P. 453–457.

19. *Косых Л. А., Лебедев Ю. А., Чувывров А. Н., Машкина Е. А.* / Структура и динамика молекулярных систем: сб. статей X Всерос. конф. – Йошкар-Ола, 2003. Ч. 1. С. 159–161.

Доломатов Михаил Юрьевич, рук. лаб., д.х.н., профессор.

E-mail: mdolomatov@bk.ru

Шуткова Светлана Александровна, доцент, к.х.н.

E-mail: Svetlana-Shutkova@yandex.ru

Родионов Александр Александрович, электроник.

E-mail: rodionovshurik@yandex.ru

Бахтизин Рауф Загидович, д.ф.-м.н., профессор.

E-mail: mdolomatov@bk.ru

Гильманшина Карина Айдаровна, аспирант.

E-mail: karina.gilmandshina@gmail.com

¹ Уфимский межвузовский кампус евразийского Ноц. Россия, Республика Башкортостан, 450074, г. Уфа, ул. Заки Валиди, 32/2.

² Башкирский государственный аграрный университет. Россия, Республика Башкортостан г. Уфа, 450001, ул. 50-летия Октября, 34.

³ Институт физики Казанского (Приволжского) федерального университета.

Россия, Республика Татарстан, г. Казань, 420008, ул. Кремлевская 18.

⁴ Уфимский университет науки и технологий.

Россия, Республика Башкортостан, 450074, г. Уфа, ул. З. Валиди, 32.

⁵ Уфимский государственный нефтяной технический университет.

Россия, Республика Башкортостан, 450074, г. Уфа, ул. Космонавтов, 1.

Статья поступила в редакцию 17.01.2025

После доработки 13.03.2025

Принята к публикации 26.03.2025

Шифр научной специальности: 1.3.8

© Доломатов М. Ю., Шуткова С. А., Родионов А. А., Бахтизин Р. З., Гильманшина К. А., 2025

PACS: 81.05.-t

Conjoined diamagnetic-paramagnetic and dielectric-semiconductor phase transitions in multicomponent amorphous hydrocarbon media

M. Y. Dolomatov¹, S. A. Shutkova², A. A. Rodionov³, R. Z. Bakhtizin⁴ and K. A. Gilmanshina⁵

¹ Laboratory of the Centre for Carbon Technologies
of the Ufa Interuniversity Campus of Eurasian Noz.
32/2, Zaki Validi st., Ufa, 450074 Republic of Bashkortostan, Russia

² Bashkir State Agrarian University
34, 50-letiya Oktyabrya st., Ufa, 450001 Republic of Bashkortostan, Russia

³ Institute of Physics Kazan (Volga Region) Federal University⁷
18, Kremlevskaya st., Kazan, 420008 Republic of Tatarstan, Russia

⁴ Ufa University of Science and Technology
32, Z. Validi st., Ufa, 450074 Republic of Bashkortostan, Russia

⁵Ufa State Oil Technical University
1, Kosmonavtov st., Ufa, 450062 Republic of Bashkortostan, Russia

Received 17.01.2025; revised 13.03.2025; accepted 26.03.2025

It is shown that high-molecular oil materials, which include concentrates of asphalt-resinous substances – bituminous substances, asphalts, oil resins, pecks, etc. have special properties. Such materials are characterised by conjugate phase transitions ‘dielectric-semiconductor’ and ‘diamagnetic-paramagnetic’ at temperatures above the softening point (glass transition). According to the totality of magnetoelectric and rheological properties, it can be assumed that the systems under consideration are frustrated paramagnetic organic spin glasses. The results of the experiment carried out with a sample of petroleum asphalt are proof of such effects. EPR data show that when heating asphalt there is an increase in the amount of PMC: with a simultaneous increase in electrical conductivity, which indicates a phase transition ‘dielectric-semiconductor’, which is associated with an increase in the amount of phase paramagnetic. The conduction activation energy (2.56 eV) and viscosity activation energy of the asphalt sample (0.95 eV) were calculated. Such a change in the electrophysical and magnetic properties of the investigated materials indicate the possibility of their application as materials with a wide range of electrically conductive and magnetic properties.

Keywords: amorphous oil media; multicomponent paramagnetic organic spin glasses; dielectric-semiconductor phase transition; diamagnetic-paramagnetic phase transition.

REFERENCES

- Zang X., Dong Y., Jian C. et al., *Matter* **5** (2), 430–447 (2022).
- Gonzalez D., Montes-Moran M. A. and Garcia A. B., *Energy and Fuels* **17**, 1324–1329 (2003).
- Keller B. D., Ferralis N. and Grossman J. C., *Nano Lett.* **16**, 2951–2957 (2016).
- Dolomatov M. Yu., Petrov A. M., Bakhtizin R. Z. et al., *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering* **195**, 29–32 (2017).
- Dolomatov M. Yu., Desortsev S. V. and Shutkova S. A., *Journal of Materials Science and Engineering* **2** (2), 151–157 (2012).
- Garifianov N. S. and Kozyrev B. M., *Journal of Experimental and Theoretical Physics* **30** (2), 272–276 (1956).
- Unger F. G. and Andreeva L. N. *Fundamental aspects of oil chemistry. Nature of resins and asphaltenes.* Novosibirsk, Science, 1995.
- Yen T. and Chilingarian G. *Asphaltenes and asphalts. Developments in petroleum science.* New York, Elsevier, 1994.
- Diep H. T., *Journal of Science: Advanced Materials and Devices*, 31–44 (2016).
- Tisser M., Delamotte B. and Mouhanna D., *Physical Review Letters* **84** (22), 5208–5211 (2000).
- Dotsenko V. S., *Advances in the physical sciences* **165** (5), 481–528 (1995).
- Dolomatov M. Yu. *Fragments of the theory of real substance.* Moscow, Chemistry, 2005.
- Dolomatov M. Yu., Rodionov A. A., Petrov A. M., Gafurov M. R., Orlinskii S. B., Biktagirov T. B. and Makarchikov S. O., *Magnetic Resonance in Solids*, № 1, 1–7 (2016).
- Dolomatov M. Yu., Gafurov M. R., Rodionov A. A. et al., *IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science* **155**, 82–90 (2018).
- Dolomatov M. Yu., Shutkova S. A., Bakhtizin R. Z., Dolomatova M. M., Latypov K. F., Gilmanshina K. A. and Badretdinov B. R., *Petrochemistry* **60** (1), 20–25 (2020).
- Ryzhikov O. L., Safargalin I. N., Petrov A. M. and Dolomatov M. Yu. *Automated measuring complex of electrophysical properties of high resistive materials. Useful model.* Patent № 154974 (RF). 2015.
- Dolomatov M. Yu., Shutkova S. A., Kavayev A. G. et al., *Electrotechnical and information complexes and systems*, № 3, 109–114 (2013).
- Dolomatov M. Yu., Petrov A. M., Bakhtizin R. Z. et al., *Inorganic materials: applied research*, № 7, 453–457 (2016).
- Kosykh L. A., Lebedev Y. A., Chuvyrov A. N. and Mashkina E. A. *Structure and Dynamics of Molecular Systems: Proceedings of the X All-Russian Conference.* Yoshkar-Ola, 2003. Part. 1, pp. 159–161.