

ЭЛЕКТРОРЕОЛОГИЧЕСКОЕ ПОВЕДЕНИЕ СУСПЕНЗИЙ ПОЛИДИМЕТИЛСИЛОКСАНА, НАПОЛНЕННОГО ГАЛЛУАЗИТОМ

Н.М. Кузнецов, С.И. Белоусов, Н.П. Бессонова, С.Н. Чвалун

Никита Михайлович Кузнецов*, Сергей Иванович Белоусов, Сергей Николаевич Чвалун

Лаборатория полимерных материалов отдела нанобиоматериалов и структур Курчатовского комплекса НБИКС технологий, Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт», пл. Академика Курчатова 1, Москва, Российская Федерация, 123182.

E-mail: kyz993@yandex.ru*, serbell@gmail.com, chvalun_sn@nrcki.ru

Наталья Павловна Бессонова

Лаборатория полимерных композиционных материалов, АО "НИФХИ им. Л.Я. Карпова", 105064, Москва, пер. Обуха, д.3-1/12, стр.6.

E-mail: besson@cc.nifhi.ac.ru

Изучено реологическое поведение при 20 °С электрореологических жидкостей на основе силиконового масла, наполненных нанотрубками галлуазита, с различным содержанием воды. Кривые течения и вязкости, модули накопления и потерь измеряли с помощью ротационного вискозиметра с геометрией «цилиндр - цилиндр», частотные зависимости электрической проводимости и тангенса диэлектрических потерь получены методом диэлектрической спектроскопии. При приложении электрического поля к образцам изменяется их реологическое поведение - значения пределов текучести возрастают. При этом кривые вязкости демонстрируют упругое поведение при малых напряжениях сдвига и проявляют ньютоновское течение при преодолении предела текучести. Частотные зависимости модулей накопления и потерь подтверждают полученные на кривых течения результаты. Исследовано влияние напряженности электрического поля на величину электрореологического эффекта. Показано влияние воды на электрореологические и электрофизические свойства. Электрореологическая жидкость с наполнителем, содержащим небольшое количество воды, проявляет лучший отклик на приложение электрического поля, о чем свидетельствуют более высокие значения пределов текучести по сравнению с образцом, содержащим осушенный наполнитель. Малое содержание воды не оказывает сильного влияния на электропроводность исследуемых систем, однако её присутствие существенно изменяет вид тангенса диэлектрических потерь – вклад электропроводности в релаксационные процессы оказывается значительным, а также изменяется характер релаксационных переходов, что может быть связано с различной поляризуемостью влажного и осушенного наполнителя. Работа демонстрирует перспективность применения наноразмерных наполнителей с высоким характеристическим отношением в качестве дисперсной фазы для электрореологических жидкостей.

Ключевые слова: электрореологические жидкости, галлуазит, полидиметилсилоксан, реология, диэлектрическая спектроскопия

ELECTRORHEOLOGICAL BEHAVIOR OF SUSPENSIONS BASED ON POLYDIMETHYLSILOXANE FILLED WITH HALLOYSITE

N.M. Kuznetsov, S.I. Belousov, N.P. Bessonova, S.N. Chvalun

Nikita M. Kuznetsov*, Sergey I. Belousov, Sergey N. Chvalun

Laboratory of Polymer Materials, Department of Nanobiomaterials and Structures, Kurchatov Complex of NBICS Technologies, National Research Center "Kurchatov Institute", Pl. Academician Kurchatov, 1, Moscow, 123182, Russia

E-mail: kyz993@yandex.ru*, serbell@gmail.com, chvalun_sn@nrcki.ru

Natalya P. Bessonova

Laboratory of Polymer Composite Materials, AO Karpov Research Institute of Physical Chemistry, per. Obukha 3-1/12 st. 6, 105064, Russia

E-mail: besson@cc.nifhi.ac.ru

The rheological behavior at 20 °C of electrorheological fluids based on silicone oil filled with halloysite nanotubes with different water content was studied. Flow and viscosity curves, storage and loss moduli were measured using a cylinder-cylinder rotary viscometer. The frequency dependences of electrical conductivity and dielectric loss tangent were obtained by dielectric spectroscopy. When an electric field is applied to the samples, their rheological behavior changes - the values of the yield stress increase. In this case, the viscosity curves exhibit an elastic behavior at low shear stresses and exhibit a Newtonian flow when the yield point is overcome. The frequency dependences of the storage and loss moduli confirm the results obtained on the flow curves. The electric field intensity influence on the magnitude of the electrorheological effect was also investigated. The effect of water presence on electrorheological and electrophysical properties was shown. Electrorheological fluid with a small amount of water exhibits a better response to the electric field application, as evidenced by higher values of the yield stresses in comparison with the sample containing drained filler. The small water content does not have a strong effect on the electrical conductivity of the systems under study, but its presence significantly changes the form of the dielectric loss tangent - the contribution of the electrical conductivity to the relaxation processes is significant, and the nature of the relaxation transitions changes due to the different polarizabilities of the wet and dried filler. This work demonstrates the prospects of using nanoscaled fillers with a high aspect ratio as the dispersed phase for electrorheological fluids.

Keywords: electrorheological fluids, halloysite, polydimethylsiloxane, rheology, dielectric spectroscopy

Для цитирования:

Кузнецов Н.М., Белоусов С.И., Бессонова Н.П., Чвалун С.Н. Электрореологическое поведение суспензий полидиметилсилоксана наполненного галлуазитом. *Иzv. вузов. Химия и хим. технология.* 2018. Т. 61. Вып. 6. С. 41–47

For citation:

Kuznetsov N.M., Belousov S.I., Bessonova N.P., Chvalun S.N. Electrorheological behavior of suspensions based on polydimethylsiloxane filled with halloysite. *Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Khim. Khim. Tekhnol.* 2018. V. 61. N 6. P. 41–47

ВВЕДЕНИЕ

Электрореологические жидкости (ЭРЖ) обычно представляют собой гетерогенные системы, состоящие из непроводящей среды и полупроводниковой дисперсной фазы [1]. ЭРЖ относятся к классу «умных» материалов – они способны быстро и обратимо изменять свои свойства при приложении электрического поля [2]. Впервые электрореологический эффект наблюдал Уинслоу в середине прошлого столетия [3], однако интерес

к ЭРЖ значительно возрос в XXI веке, о чем свидетельствует большое количество работ в этой области [4-10], а также открытие гигантского электрореологического эффекта [12-13]. Механизм электрореологического эффекта заключается в ориентации частиц дисперсной фазы вдоль силовых линий электрического поля (ЭП) с образованием протяженных, «колончатых» структур [14-16]. Также известно активирующее влияние не-

большого содержания полярных веществ, например, таких как вода или эфиры, на реологические свойства ЭРЖ [17,18].

При использовании сильно анизотричных наполнителей ($l/d \sim 10^2-10^3$) можно ожидать существенный эффект при невысоких наполнениях системы (менее 10 масс.%) [19,20]. Одним из таких наполнителей является галлуазит. Он относится к классу алюмосиликатов, элементарный слой которого образован одной тетраэдрической сеткой и одной октаэдрической. Связь между слоями осуществляется за счет водородных сил и взаимодействий дефектов изоморфного замещения с компенсационными катионами. Известно, что галлуазит чаще всего образует трубчатую структуру, длиной до нескольких микрон и диаметром $\sim 10-100$ нм с полостью внутри, в которую могут проникать молекулы различных соединений [21], например, в случае ЭРЖ, дисперсионной среды. При нагревании до температуры 60°C легко теряет значительную часть воды и переходит в метастабильную форму [22]. Целью данной работы являлось исследование ЭРЖ, наполненных галлуазитом, и оценка влияния небольшого содержания воды на электро-реологический эффект.

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Объектом исследования были выбраны электро-реологические жидкости на основе полидиметилсилоксана (ПДМС) (ПМС-100, ООО «Пента Юниор», Россия). Молекулярно-массовые характеристики ПДМС по данным ГПХ: средневесовая молекулярная масса $M_w = 10700$ Да, индекс полидисперсности 1,8. В качестве наполнителя использовали нанотрубки Галлуазита (Halloysite nanoclay, Sigma-Aldrich, США), обладающего по техническим характеристикам длиной трубки 1-3 мкм и диаметром 30-70 нм. Использовали два вида наполнителя – исходный с содержанием воды, заявленным производителем, и осушенный под вакуумом при 60°C в течение 12 ч и далее при 80°C в течение 2 ч. Суспензии (8 масс.%) получали диспергированием наполнителя в ПДМС с помощью магнитной мешалки в течение 72 ч и последующей ультразвуковой обработкой в ванне Elmasonic S 40 H, 340 Вт, 37 кГц в течение 20 мин.

Реологические исследования проводили методом ротационной вискозиметрии на реометре Physica MCR 501 Anton Paar с измерительной системой, состоящей из двух коаксиальных цилиндров, устроенных по принципу Серле. Потенциал подавали от источника постоянного высокого

напряжения FuG HCP 14 – 12500 MOD на внутренний цилиндр, изолированный от внешнего цилиндра и прибора керамическим вкладышем. Объем ячейки 20 мл, зазор 1 мм, напряженность электрического поля варьировали в диапазоне 0-7кВ/мм, с шагом 1 кВ/мм. Измерения осуществляли в режиме постоянных напряжений сдвига (CSS). Для определения модулей потерь, накоплений и комплексной вязкости проводили динамические измерения при значениях амплитуды, находящихся в линейном диапазоне вязкоупругих свойств.

Диэлектрические спектры образцов измеряли с помощью импеданс-анализатора Novocontrol Alpha-A, оборудованного диэлектрической ячейкой ZGS Alpha Active Sample Cell с дисковыми электродами диаметром 20 мм. Частотный диапазон измерений от 1 Гц до 1 МГц, температура измерений 20°C .

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Для исследуемых образцов были получены кривые течения и вязкости при различных значениях напряженности ЭП. На рис. 1 в качестве примера приведены зависимости напряжения сдвига (рис. 1а) и динамической вязкости (рис. 1б) от скорости сдвига для образцов с осушенным и исходным наполнителем без приложения ЭП и при напряженности поля 6 кВ/мм. Вне ЭП на кривых течения имеется небольшой предел текучести, величина которого резко возрастает с увеличением прикладываемого напряжения ЭП. Наличие предела текучести вне ЭП говорит об образовании перколяционной сетки в растворе при исследуемой концентрации, что достигается за счет высокой анизотричности частиц наполнителя. При включении ЭП частицы наполнителя ориентируются вдоль силовых линий, образуя прочную структуру, за счет чего увеличиваются значения предела текучести. На кривых вязкости (рис. 1б) наблюдается снижение вязкости с увеличением скорости сдвига и выход значений на плато – при больших скоростях сдвига суспензии проявляют ньютоновское поведение. Такой характер изменения вязкости системы связан с разрушением перколяционной сетки и преодолением предела текучести. Следует также отметить, что при напряженности поля 6 кВ/мм значения динамической вязкости несколько выше чем, вне поля. По кривым течения образцов были определены значения пределов текучести при различных величинах напряженности прикладываемого ЭП (рис. 2). Из рисунка видно, что значения пределов текучести выше для образца с исходным

наполнителем, чем с осушенным, и при 7 кВ/мм достигают 51,1 и 44,6 Па соответственно. Это различие, очевидно, связано с наличием в системе адсорбированной воды, являющейся активатором электрореологического эффекта. Кроме того, из данных следует, что до определенного значения напряженности поля величины предела текучести не изменяются – 2 кВ/мм для исходного наполнителя и 3 кВ/мм для осушенного, что говорит о существенном проявлении электрореологического эффекта только после превышения некоторого критического значения величины прикладываемого напряжения. Однако упрочнение структуры для обоих образцов наблюдается даже при невысоких напряженностях поля, о чем свидетельствуют значения модулей накопления (G') и потерь (G''). На рис. 3 в качестве примера приведены значения

модуля накопления и модуля потерь для образца с осушенным наполнителем при различных напряженностях ЭП. Вне ЭП при низких частотах модуль G' превышает модуль G'' – образец ведет себя как твердое тело (обладает пределом текучести). С увеличением угловой частоты модули пересекаются, и значения модуля потерь становятся выше значений модуля накоплений – образец ведет себя как жидкость. При приложении ЭП величины обоих модулей растут, а точка пересечения смещается в сторону больших частот – происходит упрочнение структуры. И при напряженности поля 4 кВ/мм модуль G' превышает модуль G'' во всем исследуемом диапазоне частот – дальнейшее увеличение напряженности ЭП приводит только к возрастанию значений модулей.

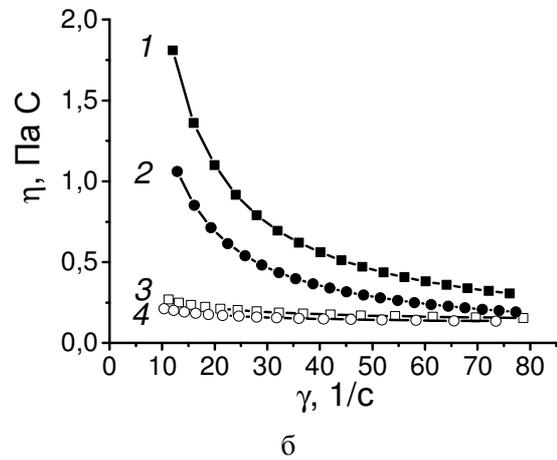
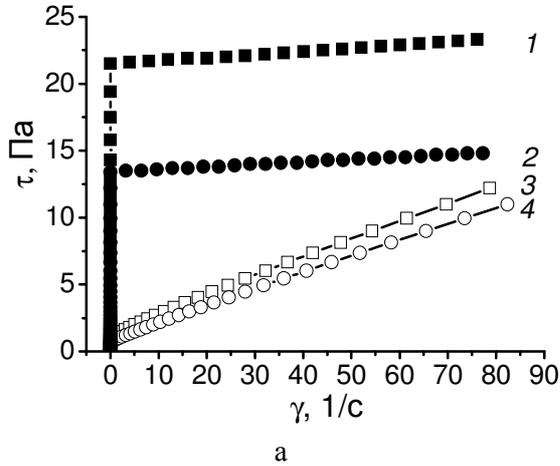


Рис. 1. Кривые течения (а) и кривые вязкости (б) для образцов с исходным наполнителем (квадраты) и осушенным (круги), при напряженности электрического поля 0 кВ/мм (пустые) и 6 кВ/мм (заполненные)

Fig. 1. Flow (a) and viscosity curves (б) for samples with initial filler (squares) and drained (circles) at an electric field strength of 0 kV/mm (empty) and 6 kV/mm (filled)

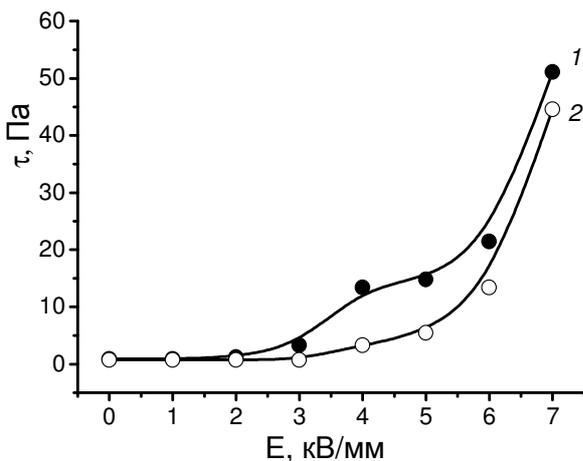


Рис. 2. Изменения значений пределов текучести с ростом напряженности электрического поля для образцов с исходным наполнителем (заполненные) и осушенным (пустые)
Fig. 2. The yield stress changes with electric field strength increasing for samples with initial filler (filled) and drained (empty)

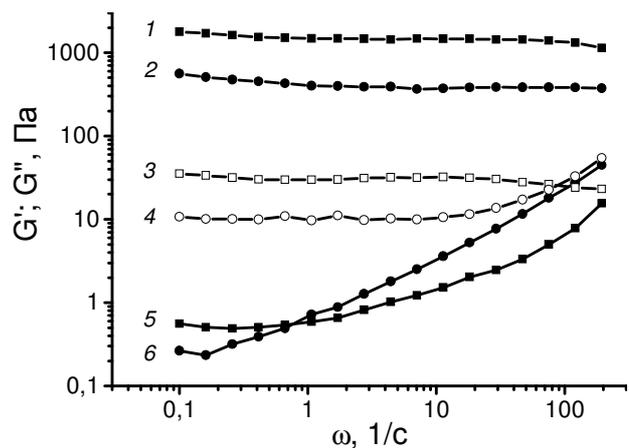


Рис. 3. Модули накопления (квадраты) и потерь (круги) для образца с осушенным наполнителем при напряженности ЭП: 0 кВ/мм (5,6), 3 кВ/мм (3,4) и 4 кВ/мм (1,2)
Fig. 3. Storage (squares) and loss (circles) moduli for the sample with drained filler at voltage: 0 kV/mm (5,6), 3 kV/mm (3,4) and 4 kV/mm (1,2)

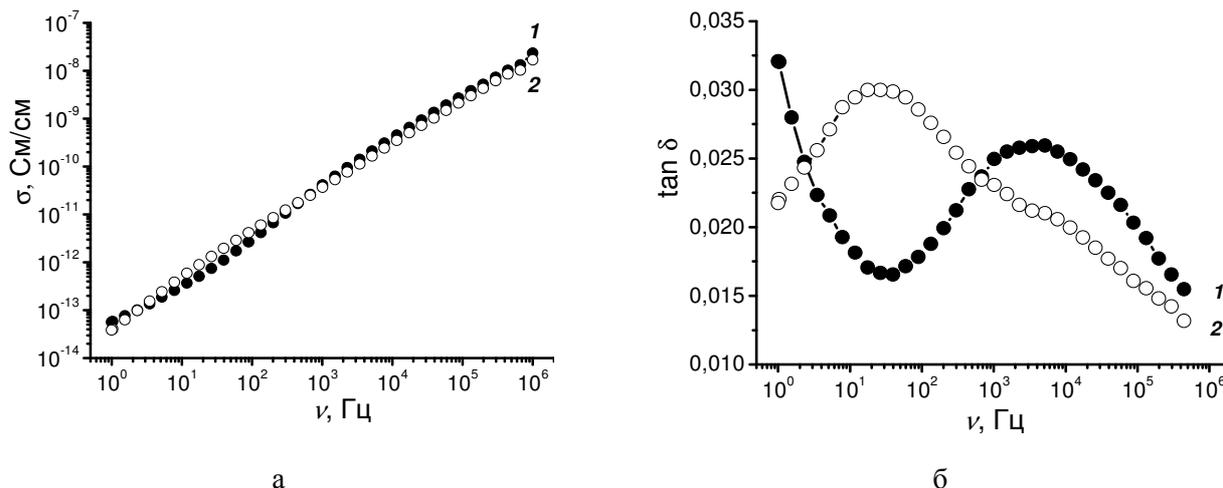


Рис. 4. Изменение электрической проводимости (а) и тангенса диэлектрических потерь (б) с частотой ЭП для образца с исходным наполнителем (заполненные) и осушенным (пустые)

Fig. 4. Electrical conductivity (a) and dielectric loss tangent (б) changes with the frequency of electric field for the sample with initial filler (filled) and drained (empty)

Разница в электрореологическом поведении образцов с исходным и осушенным наполнителем, очевидно, связана с наличием в системе некоторого количества воды и различного отклика систем на воздействие ЭП. Поэтому для оценки электрофизических характеристик исследуемых систем были получены их диэлектрические спектры. На рис. 4а приведены зависимости электрической проводимости для исследуемых образцов. Можно отметить, что с ростом частоты проводимость возрастает на 5 порядков, и при осушении наполнителя характер зависимости меняется слабо, однако незначительные изменения в электрической проводимости отражаются на характере зависимостей тангенса диэлектрических потерь: при переходе от исходного наполнителя к осушенному вид зависимостей значительно меняется (рис. 4б). На обеих кривых присутствуют максимумы, однако в случае исходного наполнителя можно выделить один релаксационный переход – максимум, находящийся в области частот порядка 10^5 Гц, а также возрастание значений тангенса при низких частотах, что, вероятно, и связано с небольшими различиями в электрической проводимости. В случае осушенного наполнителя влияние проводимости при низких частотах сказывается менее существенно, и на зависимости тангенса диэлектрических потерь можно выделить два максимума – первый в области малых частот порядка 10^1 - 10^2 Гц и второй (в виде плеча), совпадающий с положением максимума в образце с исходным наполнителем. Релаксационный переход в области больших частот может быть связан с взаимодействием зарядов на стенках внутри трубки галлуазита, а второй релаксационный переход, наблюдаемый только для

суспензии с осушенным наполнителем, вероятно, отвечает за некоторое специфическое взаимодействие ПДМС с частицей, которое отсутствует в случае исходного наполнителя, по-видимому, из-за адсорбированных оболочек воды. Однако природа данных явлений требует дополнительного изучения.

ВЫВОДЫ

В работе изучены свойства двух ЭРЖ, наполненных галлуазитом. Вода оказывает активационное действие на электрореологический эффект и увеличивает значения пределов текучести. ЭП упрочняет структуру, образованную в суспензии, независимо от величины прикладываемого напряжения, однако существует критическое значение напряженности поля ~ 3 кВ/мм для образца с исходным наполнителем и ~ 4 кВ/мм с осушенным, при котором электрореологический эффект начинает существенно проявляться. Присутствие в системе воды также сильно сказывается на электрофизических свойствах образцов: при осушении появляется дополнительный релаксационный переход на частотной зависимости тангенса диэлектрических потерь. Образцы показали достаточно высокие значения пределов текучести в ЭП при невысоком наполнении системы, что говорит о перспективности использования галлуазита в качестве наполнителя для ЭРЖ.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке РФФИ, проект 15-03-01121 А.

Авторы статьи благодарят ресурсные центры органических и гибридных материалов «Полимер» и электрофизических методов «Электрофизика» НИЦ «Курчатовский институт» за возможность проведения реологических и диэлектрических исследований.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Кирсанов Е.А., Матвеев В.Н.** Неньютоновское течение дисперсных, полимерных и жидкокристаллических систем. Структурный подход. М.: Техносфера. 2016. 384 с.
2. **Kwon S.H., Piao S.H., Choi H.J.** Electric Field-Responsive Mesoporous Suspensions: A Review. *Nanomaterials*. 2015. V. 5. P. 2249-2267. DOI: 10.3390/nano5042249.
3. **Winslow W.M.** US Patent N 2417 850. 1947.
4. **Яновский Ю.Г., Згаевский В.Э., Карнет Ю.Н., Образцов И.Ф.** Электрореологические жидкости. Теоретические и экспериментальные подходы к их описанию. *Физическая мезомеханика*. 2003. Т. 6. № 6. С. 61-69.
5. **Metayer C, Sterligov V.A., Meunier A., Bossis G., Persello J., Svechnikov S.V.** Field induced structures and phase separation in electrorheological and magnetorheological colloidal suspensions. *J. Phys.: Condens. Matter*. 2004. V. 16. P. 3975-3986. DOI: 10.1088/0953-8984/16/38/015.
6. **Akhavan J.** Electro-rheological polymers. *Proc. IMechE Part G: J. Aerospace Eng.* 2007. V. 221. P. 577-587. DOI: 10.1243/09544100JAERO142.
7. **Zhang X., Xu L., Wang Q.** Electro-rheological properties of montmorillonite particles coated with titania in methyl silicone oil. *J. China Univ. Mining & Technol.* 2008. V. 18. P. 0427-0431. DOI: 10.1016/S1006-1266(08)60088-7.
8. **Коробко Е.В., Достанко А.П., Коробко А.О., Ройзман В.П., Новикова З.А., Журавский Н.А., Глоба А.И.** Электроструктурирующиеся дисперсии наноразмерных наполнителей для создания адаптивных композитов. *Наносистемы, наноматериалы, нанотехнологии*. 2011. Т. 9. № 3. С. 569-581.
9. **Zhang W.L., Choi H.J.** Fabrication of semiconducting polyaniline-wrapped halloysite nanotube composite and its electrorheology. *Colloid Polym. Sci.* 2012. V. 290. P. 1743-1748. DOI: 10.1007/s00396-012-2719-6.
10. **Wu J., Liu F., Guo J., Cui P., Xu G., Cheng Y.** Preparation and electrorheological characteristics of uniform core/shell structural particles with different polar molecules shells. *Colloids and Surfaces A: Physicochem. Eng. Aspects*. 2012. V. 410. P. 136-143. DOI: 10.1016/j.colsurfa.2012.06.033.
11. **Davydova O.I., Kraev A.S., Redozubov A.A., Trusova T.A., Agafonov A.V.** Effect of Polydimethylsiloxane Viscosity on the Electrorheological Activity of Dispersions Based on It. *Rus. J. Phys. Chem. A*. 2016. V. 90. N 6. P. 1269-1273. DOI: 10.1134/S0036024416060054.
12. **Wen W., Huang X., Yang S., Lu K., Sheng P.** The giant electrorheological effect in suspensions of nano-particles. *Nature Materials*. 2003. V. 2. P. 727-730. DOI: 10.1038/nmat993.
13. **Huang X., Wen W., Yang S., Sheng P.** Mechanisms of the giant electrorheological effect. *Solid State Communications*. 2006. V. 139. P. 581-588. DOI: 10.1016/j.ssc.2006.04.042.
14. **Wen W., Huang X., Sheng P.** Electrorheological fluids: structures and mechanisms. *Soft Matter*. 2008. V. 4. P. 200-210. DOI: 10.1039/b710948m.
15. **Sheng P., Wen W.** Electrorheological Fluids: Mechanisms, Dynamics, and Microfluidics Applications. *Annu. Rev. Fluid Mech.* 2012. V. 44. P. 143-174. DOI: 10.1146/annurev-fluid-120710-101024.
16. **Belijar G., Valdez-Nava Z., Diahm S., Laudebat L., Jones T.B., Lebey T.** Dynamics of particle chain formation in a liquid polymer under ac electric field: modeling and experiments. *J. Phys. D: Appl. Phys.* 2017. V. 50. P. 025303-025311. DOI: 10.1088/1361-6463/50/2/025303.

REFERENCES

1. **Kirsanov E.A., Matveenko V.N.** Non-Newtonian flow of disperse, polymer and liquid crystal systems. Structural approach. M.: Tekhnosfera. 2016. 384 p. (in Russian).
2. **Kwon S.H., Piao S.H., Choi H.J.** Electric Field-Responsive Mesoporous Suspensions: A Review. *Nanomaterials*. 2015. V. 5. P. 2249-2267. DOI: 10.3390/nano5042249.
3. **Winslow W.M.** US Patent N 2417 850. 1947.
4. **Yanovskii Yu.G., Zgaevskii V.E., Karnet Yu.N., Obratsov I.F.** Electrorheological fluids. Theoretical and experimental approaches to their description. *Fizich. Mesomekhanika*. 2003. V. 6. N 6. P. 61-69 (in Russian).
5. **Metayer C, Sterligov V.A., Meunier A., Bossis G., Persello J., Svechnikov S.V.** Field induced structures and phase separation in electrorheological and magnetorheological colloidal suspensions. *J. Phys.: Condens. Matter*. 2004. V. 16. P. 3975-3986. DOI: 10.1088/0953-8984/16/38/015.
6. **Akhavan J.** Electro-rheological polymers. *Proc. IMechE Part G: J. Aerospace Eng.* 2007. V. 221. P. 577-587. DOI: 10.1243/09544100JAERO142.
7. **Zhang X., Xu L., Wang Q.** Electro-rheological properties of montmorillonite particles coated with titania in methyl silicone oil. *J. China Univ. Mining & Technol.* 2008. V. 18. P. 0427-0431. DOI: 10.1016/S1006-1266(08)60088-7.
8. **Korobko E.V., Dostanko A.P., Korobko A.O., Roizman V.P., Novikova Z.A., Zhuravskiy N.A., Globa A.I.** Electrostructuring dispersions of nanosize fillers for fabrication of adaptive composites. *Nanosistemy, Nanomaterialy, Nanotekhnologii*. 2011. V. 9. N 3. P. 569-581 (in Russian).
9. **Zhang W.L., Choi H.J.** Fabrication of semiconducting polyaniline-wrapped halloysite nanotube composite and its electrorheology. *Colloid Polym. Sci.* 2012. V. 290. P. 1743-1748. DOI: 10.1007/s00396-012-2719-6.
10. **Wu J., Liu F., Guo J., Cui P., Xu G., Cheng Y.** Preparation and electrorheological characteristics of uniform core/shell structural particles with different polar molecules shells. *Colloids and Surfaces A: Physicochem. Eng. Aspects*. 2012. V. 410. P. 136-143. DOI: 10.1016/j.colsurfa.2012.06.033.
11. **Davydova O.I., Kraev A.S., Redozubov A.A., Trusova T.A., Agafonov A.V.** Effect of Polydimethylsiloxane Viscosity on the Electrorheological Activity of Dispersions Based on It. *Rus. J. Phys. Chem. A*. 2016. V. 90. N 6. P. 1269-1273. DOI: 10.1134/S0036024416060054.
12. **Wen W., Huang X., Yang S., Lu K., Sheng P.** The giant electrorheological effect in suspensions of nano-particles. *Nature Materials*. 2003. V. 2. P. 727-730. DOI: 10.1038/nmat993.
13. **Huang X., Wen W., Yang S., Sheng P.** Mechanisms of the giant electrorheological effect. *Solid State Communications*. 2006. V. 139. P. 581-588. DOI: 10.1016/j.ssc.2006.04.042.
14. **Wen W., Huang X., Sheng P.** Electrorheological fluids: structures and mechanisms. *Soft Matter*. 2008. V. 4. P. 200-210. DOI: 10.1039/b710948m.
15. **Sheng P., Wen W.** Electrorheological Fluids: Mechanisms, Dynamics, and Microfluidics Applications. *Annu. Rev. Fluid Mech.* 2012. V. 44. P. 143-174. DOI: 10.1146/annurev-fluid-120710-101024.
16. **Belijar G., Valdez-Nava Z., Diahm S., Laudebat L., Jones T.B., Lebey T.** Dynamics of particle chain formation in a liquid polymer under ac electric field: modeling and experiments. *J. Phys. D: Appl. Phys.* 2017. V. 50. P. 025303-025311. DOI: 10.1088/1361-6463/50/2/025303.
17. **Shen C., Wen W., Yang S., Sheng P.** Wetting-induced electrorheological effect. *J. Appl. Phys.* 2006. V. 99. P. 106104. DOI: 10.1063/1.2199749.

17. **Shen C., Wen W., Yang S., Sheng P.** Wetting-induced electrorheological effect. *J. Appl. Phys.* 2006. V. 99. P. 106104. DOI: 10.1063/1.2199749.
18. **Espin M.J., Delgado A.V., Plocharski J.Z.** Effect of additives and measurement procedure on the electrorheology of hematite/silicone oil suspensions. *Rheol Acta.* 2006. V. 45. P. 865–876. DOI: 10.1007/s00397-005-0069-8.
19. **Yin J., Zhao X.** Titanate nano-whisker electrorheological fluid with high suspended stability and ER activity. *Nanotechnology.* 2006. V. 17. P. 192–196. DOI: 10.1088/0957-4484/17/1/031.
20. **Lee S., Yoon C.-M., Hong J.-Y., Jang J.** Enhanced electrorheological performance of a graphene oxide-wrapped silica rod with a high aspect ratio. *J. Mater. Chem. C.* 2014. V. 2. P. 6010 - 6016. DOI: 10.1039/c4tc00635f.
21. **Рожина Э.В., Данилушкина А.А., Науменко Е.А., Львов Ю.М., Фахруллин Р.Ф.** Нанотрубки галлуазита – перспективный биосовместимый материал для «умных» композитов с инкапсуляцией биологически активных веществ. *Гены и клетки.* 2014. Т. IX. № 3. С. 25-28.
22. **Joussein E., Petit S., Churchman J., Theng B., Righi D., Delvaux B.** Halloysite clay minerals - a review. *Clay Minerals.* 2005. V. 40. P. 383 – 426. DOI: 10.1180/0009855054040180.
18. **Espin M.J., Delgado A.V., Plocharski J.Z.** Effect of additives and measurement procedure on the electrorheology of hematite/silicone oil suspensions. *Rheol Acta.* 2006. V. 45. P. 865–876. DOI: 10.1007/s00397-005-0069-8.
19. **Yin J., Zhao X.** Titanate nano-whisker electrorheological fluid with high suspended stability and ER activity. *Nanotechnology.* 2006. V. 17. P. 192–196. DOI: 10.1088/0957-4484/17/1/031.
20. **Lee S., Yoon C.-M., Hong J.-Y., Jang J.** Enhanced electrorheological performance of a graphene oxide-wrapped silica rod with a high aspect ratio. *J. Mater. Chem. C.* 2014. V. 2. P. 6010 - 6016. DOI: 10.1039/c4tc00635f.
21. **Rozhina E.V., Danilushkina A.A., Naumenko E.A., Lvov Yu.M., Fakhrullin R.F.** Halloysite nanotubes is a promising biocompatible material for «smart» composites with encapsulation of biologically active substances. *Geny i Kletki.* 2014. V. IX. N 3. P. 25-28 (in Russian).
22. **Joussein E., Petit S., Churchman J., Theng B., Righi D., Delvaux B.** Halloysite clay minerals - a review. *Clay Minerals.* 2005. V. 40. P. 383 – 426. DOI: 10.1180/0009855054040180.

Поступила в редакцию 30.11.2017
Принята к опубликованию 27.04.2018

Received 30.11.2017
Accepted 27.04.2018