

Сравнение эффективности гибридных органо-неорганических нанокompозитов в качестве наполнителей электрореологических жидкостей

И. В. Шиханова, А. С. Краев, А. В. Агафонов

Проведено сопоставление электрореологической эффективности и диэлектрических спектров суспензий в силиконовом масле ПМС-20 гибридного материала на основе диоксида титана и блоксополимера полипропиленгликоль-полиэтиленгликоль-полипропиленгликоль (блок-сополимер ППГ-ПЭГ-ППГ), полученного золь-гель методом, в качестве наполнителя электрореологической жидкости, с полученными ранее характеристиками суспензий наноразмерного диоксида титана и гибридных органо-неорганических материалов диоксид титана – полипропиленгликоль (ППГ) и диоксид титана – полиэтиленгликоль (ПЭГ). Показано, что введение в структуру материала блок-сополимера снижает электрореологический эффект по сравнению системами на основе диоксида титана и гибридов диоксида титана с ППГ и ПЭГ.

Ключевые слова: диоксид титана, гибридные материалы, золь-гель синтез, электрореологический эффект

Hybrid materials based on titania and PPG – PEG – PPG block copolymer was synthesized by sol – gel route. Comparison of electrorheological activity and dielectric spectra of suspensions in silicon oil of new composition with TiO_2 – PEG and TiO_2 – PPG (obtained earlier) was conducted. It was shown that implementation in material structure of block copolymer leads to decreasing electrorheological effect comparing with systems based TiO_2 – PEG and TiO_2 – PPG.

Key words: titania, hybrid materials, sol – gel synthesis, electrorheological effect.

Введение

Электрореологические жидкости представляют собой сложные коллоидные системы, образованные дисперсной фазой со специально организованной структурой и обладающей диэлектрическими свойствами, размеры частиц которой составляют от 10 до 1000 нм, и диэлектрической жидкостью в качестве дисперсионной среды [1 – 4]. Как правило, используются жидкости с низкими значениями диэлектрической проницаемости и электропроводности ($\epsilon \approx 2$, $\sigma < 10^{-15}$ См/м). Требования к вязкости жидкости определяются в зависимости от условий эксплуатации (высоковязкие жидкости работают при повышенных температурах). Широкий температурный интервал существования жидкого состояния является естественным требованием. Электрореологические жидкости могут содержать добавки, усиливающие

электрореологический эффект и повышающие седиментационную и агрегативную устойчивость системы. Помимо данных требований эти жидкости должны иметь низкие абразивные свойства, быть электрохимически и коррозионно малоактивными и нетоксичными. Концентрация дисперсной фазы в практически значимых системах составляет от 20 до 60 % [5].

Главной особенностью электрореологических систем является их способность при наложении электрических полей совершать быстрые (в пределах миллисекунд) обратимые (при снятии поля эффект исчезает) переходы от жидкого состояния к вязкопластическому, вплоть до полной потери текучести и приобретения свойств твердого тела. Поскольку физико-механические характеристики электрореологических жидкостей изменяются пропорционально напряженности электрического поля, откры-

вается возможность управлять свойствами системы, например, вызывать контролируемое сопротивление приложенной силе.

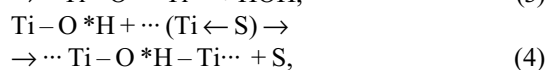
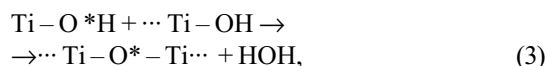
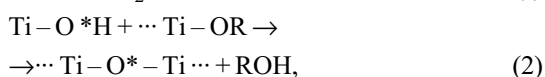
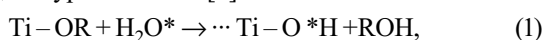
Цель данной работы — сравнение электрореологической эффективности полученных золь-гель методом гибридных наноматериалов, включающих в структуру фазу диоксида титана и органические субстраты в виде полимеров ПЭГ, ППГ, а так же блок-сополимера ППГ-ПЭГ-ППГ в качестве наполнителей электрореологической жидкости на основе полидиметилсилоксана ПМС-20.

Экспериментальная часть

Синтез гибридного органо-неорганического материала

Синтез порошков диоксида титана и гибридного материала проводили золь-гель методом. Как правило, он представляет собой методику синтеза неорганических материалов в жидкости при низкой температуре. Принципиальный механизм данного синтеза заключается в образовании устойчивого коллоидного раствора, состоящего из наночастиц размером от 1 до 1000 нм, формирующихся в результате гидролиза и конденсации прекурсора соответствующего вещества, который, как правило, является неорганической солью или металлоорганическим соединением. Такие наночастицы, находящиеся в свободном дисперсном состоянии, формируют коллоидный раствор, который называется золей. В результате конденсации полученные наночастицы начинают связываться и образовывать трехмерные каркасные сетки по всему объему коллоидного раствора, который называется гелем [6].

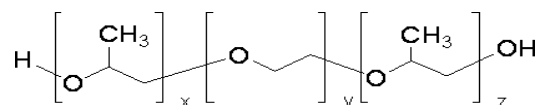
Авторами работы [7] был предложен золь-гель синтез монодисперсных оксидов металлов путем гидролиза соответствующих алкоксидов общей формулы $Me(OR)_n$, где R-алкоксидный радикал. Гидролиз проводится в спиртовой среде с добавлением воды. Соотношение вода/алкоксид определяет вид образующихся частиц. При мольном соотношении 1,5–3 образуются монодисперсные частицы размером от 0,52 до 1,2 мкм. Получаемые частицы аморфны и представляют собой преимущественно гидроксиды. Термообработка частиц позволяет перевести их в кристаллическое состояние. Гидролиз алкоколятов титана может быть представлен следующими уравнениями [8]:



где S — растворитель (изопропанол).

Методика синтеза приведена в работах [9–12].

Блок-сополимер ППГ-ПЭГ-ППГ (фирма Aldrich) — это полимер со средней молекулярной массой 2000, имеет в своем составе 50 % ПЭГ.



Методы исследования

Качественный и количественный состав диоксида титана и гибридных органо-неорганических материалов изучены методами электронной микроскопии, рентгенофазового анализа, ИК-спектроскопии и термогравиметрического (ТГ) анализа.

Термический анализ синтезированных материалов проводили на дериватографе 1000D фирмы MOM (Венгрия) с компьютерной регистрацией результатов, ИК-спектроскопию порошков — на спектрометре AVATAR, просвечивающую электронную микроскопию — на электронном микроскопе 2MB-100Л (паспортное разрешение 5 Å), рентгенофазовый анализ — на рентгеновском спектрометре ДРОН-2.

Диэлектрические спектры суспензий измеряли в цилиндрической ячейке конденсаторного типа при температуре 293 К с помощью измерителя иммитанса E7-20 в соответствии с методикой, описанной в работе [13].

Исследования электрореологических свойств проводили на реометре, модифицированном для измерения вязкости при наложении электрических полей в ячейке с параллельным расположением пластин радиусом 10 мм и зазором 1 мм [14].

Обсуждение результатов

Физико-химические свойства диоксида титана и гибридных нанокompозитов

Физико-химические свойства порошков на основе диоксида титана и композитов с ППГ и ПЭГ приведены в работах [9–11]. На рис. 1 приведен электронно-микроскопический снимок синтезированного нанокompозита с блок-сополимером ППГ-ПЭГ-ППГ на основе диоксида титана. Можно отметить, что порошок имеет полидисперсный состав с достаточно узким диапазоном размеров частиц (20–50 нм).

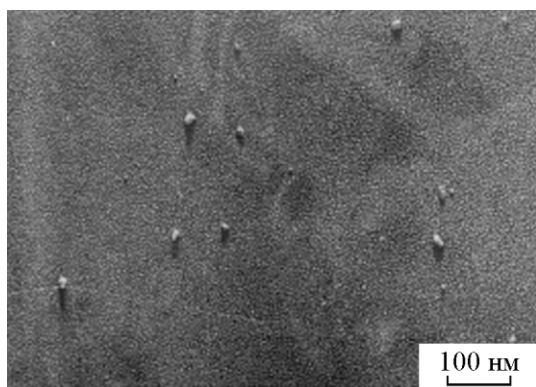


Рис. 1. Электронно-микроскопический снимок TiO_2 – ППГ-ПЭГ-ППГ.

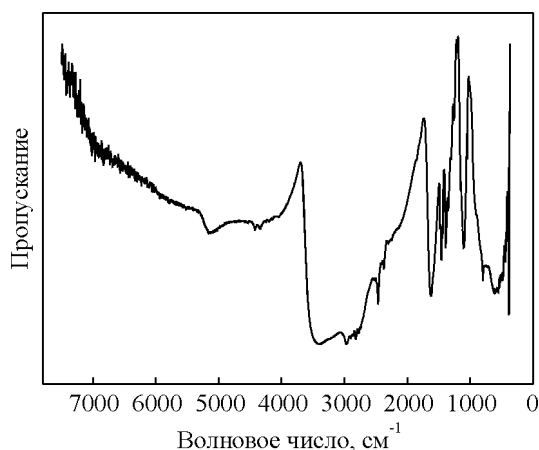


Рис. 2. ИК-спектры нанокompозита TiO_2 – блок-сополимер ППГ-ПЭГ-ППГ.

Таблица 1

Расшифровка ИК-спектра гибридного нанокompозита

Волновое число, cm^{-1}	Идентификация полос ИК-спектра
3546,59	ν -O-H
3475,57	ν -O-H
3413,92	ν -O-H
1637,82	ν -H-O-H
1616,60	ν -H-O-H
1384,63	ν - CH_3
1088,32	ν -Ti-O-C
626,31	ν -Ti-O-Ti

Источник [15, 16].

ИК-спектры наноматериала TiO_2 – блок-сополимер ППГ-ПЭГ-ППГ, приведенные на рис. 2, указывают на образование гибрида, в котором полимер и ион металла связаны оксановыми связями. Идентификация полос в ИК-спектре нанокompозита (рис. 2) приведена в табл. 1.

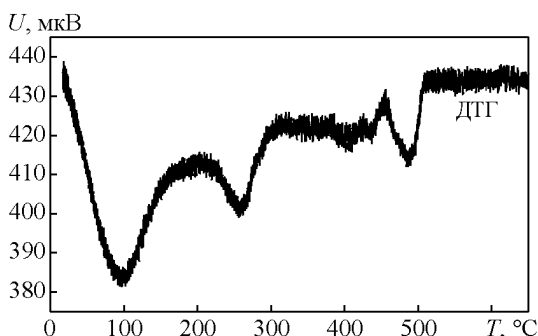
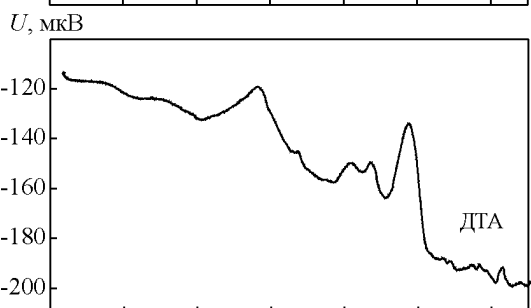
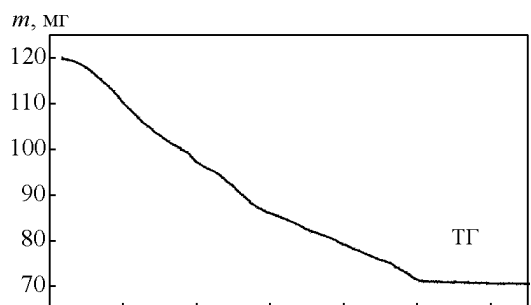


Рис. 3. Кривые термогравиметрического анализа (ТГА) синтезированного гибридного материала TiO_2 – блок-сополимер ППГ-ПЭГ-ППГ.

Из данных термограммы (рис. 3) гибридного органо-неорганического материала TiO_2 – блок-сополимер ППГ-ПЭГ-ППГ можно выделить три участка, характеризующие убыль массы. На первом интервале при температурах 20–200°C убыль массы, по-видимому, связана с удалением остаточного количества растворителя — изопропилового спирта ($t_{\text{кип}} = 82,4^\circ\text{C}$), а также с испарением основного количества воды, присутствующей в материале после сушки. Второй участок убыли массы на кривой ТГ характеризует выгорание полимера в интервале температур 220 – 400°C. Третий участок рассматриваемой кривой характеризуется незначительной убылью массы, связанной, по-видимому, с удалением адсорбированной и химически связанной воды, а также, возможно, с запаздывающим удалением продуктов горения полимера. Пики эндотермичности на кривых дифференциально-термического анализа (ДТА) свидетельствуют об удалении органических

компонентов непрореагировавших изопропоксида титана и изопропилового спирта.

На рентгенограмме гибридного органо-неорганического материала наблюдается только аморфное гало, что отражает аморфную структуру материала и его высокую дисперсность.

Диэлектрические потери могут быть связаны с процессами дипольной поляризации, накопления зарядов на границе двух фаз и проводимости в системе. В случае суспензии нанокompозита этими процессами могут быть процессы ориентационной поляризации диполей в полимерах, а также процессы накопления и разделения зарядов “внутри” частиц наногрида вследствие различных проводимостей и работ выхода электронов в полимерах и диоксиде титана. Также имеют место процессы межфазной поляризации на границе раздела между частицами материала наполнителя и диэлектрической жидкостью.

Экспериментальные данные, характеризующие свойства материалов, и используемая методика зольгель синтеза свидетельствуют о формировании в исследуемой системе органо-неорганического наногрида, включающего органический полимерный субстрат, распределенный в объеме материала.

Диэлектрические и электрореологические характеристики суспензий порошков диоксида титана и гибридных материалов в силиконовом масле ПМС-20

Авторы работы [17] утверждают, что изменение электрореологической активности различных форм порошков диоксида титана связано с изменением структуры поверхности микрочастиц, диэлектрических и поляризационных свойств частиц. Для проверки указанного предположения были проведены измерения диэлектрических параметров суспензий на основе полученных образцов. Результаты диэлектрических измерений (рис. 4) показывают, что с ростом частоты диэлектрические проницаемости суспензий уменьшаются. При этом в интервале частот до 3500 Гц диэлектрическая проницаемость суспензии на основе диоксида титана выше, чем диэлектрическая проницаемость суспензии нанокompозита, а при более высоких частотах наблюдается инверсия данной зависимости.

Как следует из зависимостей тангенса угла диэлектрических потерь в суспензии нанокompозита от частоты электрического тока, взаимодействие материалов с электрическим полем носит релаксационный характер. При этом положение частотного максимума соответствует Максвелл-Вагнеровскому

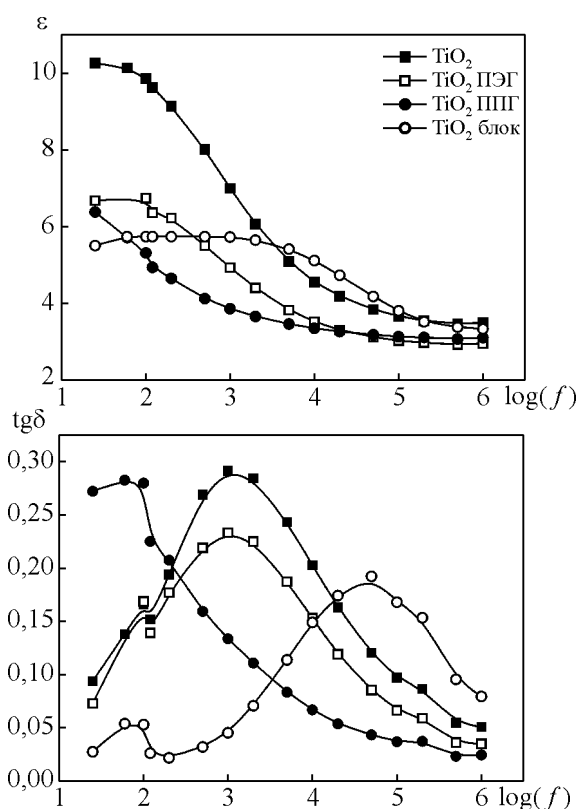


Рис. 4. Зависимости диэлектрической проницаемости и тангенса угла диэлектрических потерь в 30 % суспензиях диоксида титана и гибридных наноматериалов в ПМС-20.

механизму поляризации. Сравнение влияния типа полимера в составе нанокompозита на релаксационные характеристики показывает, что релаксация в суспензии композита TiO_2 – блок-сополимер ППГ-ПЭГ-ППГ протекает медленнее, чем в суспензии TiO_2 и композитов с ПЭГ и ППГ. Максимум потерь в случае суспензии диоксида титана приходится на частоту 3000 Гц, в случае суспензии композита TiO_2 – ПЭГ приходится на частоту 2000 Гц, а в случае суспензии композита TiO_2 – ППГ смещен в область более низких частот, композита TiO_2 – блок-сополимер ППГ-ПЭГ-ППГ на частоту 5000 Гц.

Различный характер диэлектрических характеристик и релаксационных процессов в суспензиях гибридных материалов отражается на величине электрореологического эффекта. В качестве меры электрореологической эффективности принято использовать величины напряжения сдвига или предела текучести жидкости, измеренные при наложении внешнего электрического поля. На рис. 5 приведены зависимости напряжения сдвига 30 % суспензий нанокompозитов в полидиметилсилоксане ПМС-20 в зависимости от напряженности прило-

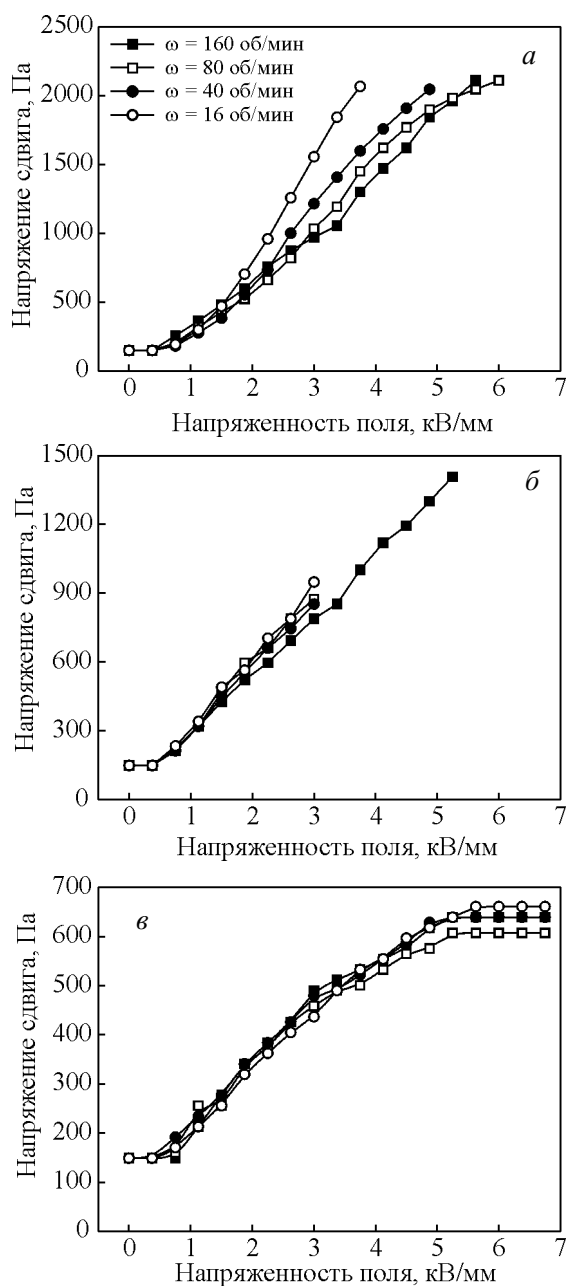


Рис. 5. Зависимости напряжений сдвига 30% суспензий гибридных наноматериалов TiO_2 -ПЭГ (а), TiO_2 -ППГ (б) и TiO_2 – блок-сополимер ППГ-ПЭГ-ППГ (в) в силиконовом масле ПМС-20 от напряженности приложенного электрического поля.

женного электрического поля и при различных скоростях сдвига. Особенностью представленных зависимостей является их выраженный нелинейный характер. При этом напряжение сдвига при различных напряженностях поля зависит от скорости сдвига — кривые образуют веер. Механическая прочность структур электрореологических жидкостей, возникающих при наложении электрического поля, связана

с образованием цепочек из поляризованных частиц наполнителя, вытянутых в направлении, параллельном направлению вектора поля, и замыкающих собой электродную систему. При увеличении напряженности поля толщина цепочек и их число увеличивается. Данный процесс в условиях наложения напряжения сдвига на систему связан с изменением угла наклона цепочек относительно вектора электрического поля, их скручиванием и разрушением. Поскольку идет непрерывное восстановление структур в электрическом поле, процесс носит кинетический характер. При этом зависимости напряжения сдвига от напряженности электрического поля при разных скоростях сдвига представляют собой пучки кривых — веера. Обращает на себя внимание, что система с наполнителем TiO_2 – блок-сополимер ППГ-ПЭГ-ППГ, характеризующаяся медленной релаксацией, не успевает восстанавливаться после разрушения ориентации поляризованных частиц движением и смещения вектора поляризации относительно вектора поля, вследствие чего напряжение сдвига в возникающих структурах слабо зависит от скорости сдвига. Система с наполнителем TiO_2 – ПЭГ, напротив, обладая высокой скоростью релаксационных процессов, успевает восстанавливаться, вследствие чего напряжение сдвига в возникших структурах закономерно возрастает с уменьшением скорости сдвига. При этом напряжение сдвига суспензии порошка TiO_2 – ПЭГ примерно в два раза выше, чем напряжение сдвига суспензии TiO_2 – ППГ при равных значениях напряженности поля и скорости сдвига. Возможно, это связано с различными величинами диэлектрических характеристик и проводимости в системах, обуславливающих поляризацию и межчастичные взаимодействия в электрических полях, приводящие к образованию прочных структур.

Известно, что жидкости, для которых вязкость не зависит от скорости деформации, называются ньютоновскими [18]. На рис. 6 в качестве примера приведена зависимость напряжения сдвига электрореологической суспензии нанокompозита диоксид титана – блок-сополимер ППГ-ПЭГ-ППГ от скорости сдвига при различных значениях напряженности электрического поля. Близость указанного графика к линейным зависимостям показывает, что дисперсия наноразмерных композитов в ПМС-20 ведет себя при наложении электрического поля как псевдопластичная жидкость, характеризующаяся предельным напряжением сдвига, увеличивающимся с ростом напряженности электрического поля. Для таких жидкостей зависимость между внутренним напряжением сдвига и градиентом скорости относительного движения слоев жидкости в логарифмических коор-

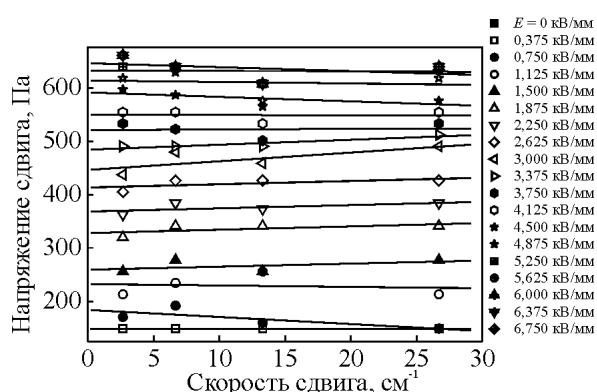


Рис. 6. Зависимость напряжения сдвига электрореологической суспензии нанокompозита диоксид титана – блок-сополимер ППГ-ПЭГ-ППГ от скорости сдвига при различных значениях напряженности электрического поля.

динагах оказывается на некотором участке линейной. Угловой коэффициент соответствующей прямой линии заключён между 0 и 1, поэтому зависимость между напряжением и градиентом скорости можно записать в следующем виде:

$$\tau = k \cdot \left(\frac{du}{dy} \right)^n, \quad n \leq 1,$$

где k — мера консистенции жидкости, n — показатель, характеризующий отличие свойств псевдопластичной жидкости от ньютоновской.

В связи с эти были определены «бингамовские» характеристики 30 % электрореологических жид-

костей на основе диоксида титана и нанокompозита на основе диоксида титана и изучаемого полимера.

Как следует из данных табл. 2 значения «бингамовской» вязкости электрореологической жидкости на основе синтезированного золь-гель методом диоксида титана и нанокompозита на его основе в системе с приложенным электрическим полем изменяются весьма незначительно, однако имеют отрицательные значения. Данное явление известно в литературе, посвященной электрореологическому эффекту, как явление отрицательной вязкости. В общем случае интерпретация данного эффекта носит констатационный характер, однако, в работе [19] показано, что отрицательная вязкость формируется в потоках, когда осуществляется передача энергии от меньших масштабов к большим. В нашем случае это должно означать, что течение электрореологической жидкости в межэлектродном зазоре структурно неоднородно. При этом на границе пластина – жидкость формируется ближний к пластине неподвижный слой электрореологической жидкости, последующие слои жидкости текут, передавая энергию от слоя к слою. По мере удаления от вращающегося электрода структура жидкости становится все более прочной, и энергии сдвига, создаваемой предыдущими слоями, недостаточно, чтобы разрушить эту структуру, внутри которой, по сути, жидкость не течет, однако сама структура вращается. Такой эффект вызывает, с одной стороны, рост предела текучести, а с другой — приводит к возникновению отрицательной вязкости, рассчитываемой по уравнению Бингама-Шведова.

Таблица 2

«Бингамовские» характеристики 30 % электрореологической жидкости на основе диоксид титана в силиконовом масле ПМС-20

E, кВ/мм	Диоксид титана		Диоксид титана – ППГ-ПЭГ-ППГ	
	τ_0	η	τ_0	η
0	133,3 ± 5,1	3,2 ± 1,8	149,2 ± 0	0 ± 0
0,375	133,3 ± 4,1	4,3 ± 1,5	149,2 ± 0	0 ± 0
0,75	159,9 ± 18,5	0 ± 6,7	184,1 ± 12,2	-1,3 ± 0,8
1,125	234,5 ± 20,2	12,8 ± 7,4	232,1 ± 20,9	-0,24 ± 1,36
1,5	383,8 ± 15,4	-2,1 ± 5,6	259,6 ± 11,1	0,56 ± 0,7
1,875	453,1 ± 12,4	8,5 ± 4,5	328,2 ± 8,7	0,62 ± 0,57
2,25	538,3 ± 25,3	16,0 ± 9,2	368,5 ± 8,4	0,59 ± 0,54
2,625	650,3 ± 37,8	12,8 ± 13,8	413,4 ± 8,7	0,6 ± 0,6
3	783,5 ± 28,9	2,1 ± 10,6	446,2 ± 16,7	1,6 ± 1,1
3,375	970,0 ± 83,2	-25,6 ± 30,4	484,3 ± 4,6	0,9 ± 0,3
3,75	996,7 ± 55,6	-18,1 ± 20,3	521,2 ± 15,5	0,1 ± 1,01
4,125	1108,6 ± 67,5	-26,6 ± 24,6	549,7 ± 11,0	-0,1 ± 0,7
4,5	1215,2 ± 69,1	-42,6 ± 25,2	591,2 ± 10,9	-0,8 ± 0,7
4,875	1279,2 ± 69,1	-42,6 ± 25,2	614,0 ± 24,1	-0,3 ± 1,6
5,25	1359,2 ± 76,7	-53,3 ± 28	632,7 ± 16,4	-0,1 ± 1,0
5,625	1391,1 ± 79,6	-56,5 ± 29,1	645,7 ± 21,3	-0,7 ± 1,4
6	1423,1 ± 59,5	-58,6 ± 21,7	645,7 ± 21,3	-0,7 ± 1,4
6,375	1439,1 ± 44,5	-68,2 ± 16,2	645,7 ± 21,3	-0,7 ± 1,4
6,75	1407,1 ± 37,7	-62,9 ± 13,8	645,7 ± 21,3	-0,7 ± 1,4

Заключение

Таким образом, полученные нами данные о влиянии типа полимера в составе нанокompозита на величину электрореологического отклика электро-реологических жидкостей с данными наполнителями позволяют расположить материалы в ряд: TiO_2 – ПЭГ > TiO_2 – ППГ > TiO_2 > TiO_2 – блок-сополимер ППГ-ПЭГ-ППГ.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ 09-03-12219ОФИ_М и программы Президиума РАН № 21.

Литература

1. Block H., Kelly J.P. Electrorheology. J. Phys. D: Appl. Phys., 1988, v. 21, p. 1661 – 1670.
2. Conrad H., Sprecher A.F., Choi Y., Chen Y. The temperature dependence of the electrical properties and strength of electrorheological fluids. Journal of Rheology. 1991, v. 35, no. 7, p. 1393 – 1409.
3. Gast A.P., Zukoski C.F. Comparison of rheological and electric properties of ER fluids bases on different materials. Adv. Colloid Interface Sci., 1989, v. 30, p. 153 – 202.
4. Hao T. Electrorheological fluids. Adv. Mater., 2001, v. 13, p. 1847 – 1852.
5. Lampe D. Materials Database on Commercially Available Electro- and Magnetorheological Fluids (ERF and MRF), <http://www.tu-Dresden.de/mwlr/lampe/HAUENG.HTM>, updated on 01/30/1997.
6. Brinker C.J., Scherer G.W. Sol-gel – glass: I. Gelation and gel structure. J. Non-Cryst. Solids., 1985, v. 70, p. 301 – 322.
7. Process for preparing monodisperse titania spheres: Заявка 89/08078 Междун. PCT MKH³ CO1G 23/053/ Olson William; Allied – Signal Inc. № 88100640; Заявл. 03.03.88. Оpubл. 08.09.89.
8. Jean J.H., Ring T.A. Nucleation and growth of monodisperse TiO_2 powders from alcohol solution in the presence of sterically stabilizing surfactant. Novel. Ceram. Fabr. Process and Appl. Meet. Basic. Sci. Sec. Inst. Ceram. Campridge, 1986, v. 11 – 33, p. 9.
9. Краев А.С., Агафонов А.В., Нефедова Т.А. и др. Физико-механические характеристики электрореологической жидкости на основе наноразмерного диоксида титана. Изв. Вузов. Химия и хим. технология. 2007, т. 50, вып. 6, с. 35 – 39.
10. Давыдова О.И., Агафонов А.В., Краев А.С., Трусова Т.А. Влияние природы растворителя и прекурсора в золь-гель методе получения диоксида титана на его электрореологическую активность. ЖПХ, 2010, т. 83, вып. 1, с. 16 – 19.
11. Агафонов А.В., Краев А.С., Давыдова О.И., Трусова Т.А., Захаров А.Г. Электрореологические и поляризационные эффекты в полидиметилсилоксановых суспензиях золь-гель нанокompозитов диоксид титана — полиэтиленгликоль и диоксид титана – полипропиленгликоль. Изв. вузов. Химия и хим. технология, 2010, т. 53, вып. 6, с. 62 – 66.
12. Агафонов А.В., Нефедова Т.А., Давыдова О.И. Электрореология суспензий мезоструктурированных и мезопористых кремнеземов в полидиметилсилоксане. Коллоидный журнал, 2008, т. 70, № 5, с. 581 – 586.
13. Эмме Ф. Диэлектрические измерения. Пер. с нем. Б.Н. Штиллера. Под ред. И.И. Заславского. М.: Химия, 1967, 223 с.
14. Нефедова Т.А., Агафонов А.В., Давыдова О.И. и др. Золь-гель синтез гибридного материала диоксид кремния / полипропиленгликоль и электрореологические характеристики его дисперсий в полидиметилсилоксане. Механика композиционных материалов и конструкций, 2006, т. 12, № 3, с. 391 – 406.
15. Vivar J.M., Serma R.M., Lara J.G. et al. Influence of Solvent Concentration on the Microstructure of SiO_2 - TiO_2 Sol-Gel Films. J. Sol-gel Sci. Technol., 1997, v. 8, p. 235 – 241.
16. Nakamoto K. Infrared and raman spectra of inorganic and coordination compounds. 4th ed. New York: Wiley, 1986.
17. Shang Y., Ma Sh., Li J. et al. Effect of microstructure on electrorheological property for pure TiO_2 particle material. J. Mater. Sci. Technol., 2006, v. 22, no. 4, p. 572 – 575.
18. Тареп А.А. Физико-химия полимеров. М.: Химия, 1968, 538 с.
19. Старр В.П. Физика явлений с отрицательной вязкостью М.: Мир, 1971, 264 с.

***Шиханова Ирина Владимировна** — Институт химии растворов РАН (г. Иваново), кандидат химических наук, научный сотрудник. Специалист в области химии гибридных нанокompозитов и супрамолекулярных систем. E-mail: ivr@isc-ras.ru.*

***Краев Антон Сергеевич** — Институт химии растворов РАН (г. Иваново), кандидат химических наук, младший научный сотрудник. Специалист в области коллоидной химии и электрореологии E-mail: ask@isc-ras.ru*

***Агафонов Александр Викторович** — Институт химии растворов РАН (г. Иваново), доктор химических наук, профессор, заведующий лабораторией. Специалист в области золь-гель технологии получения функциональных наноматериалов E-mail: ava@isc-ras.ru.*