

Е. В. Коробко, А. Н. Мурашкевич, З. А. Новикова, Е. С. Сермяжко

## ВЛИЯНИЕ СТРУКТУРЫ НАПОЛНИТЕЛЯ НА ГИДРОМЕХАНИЧЕСКИЕ И ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ЭЛЕКТРОРЕОЛОГИЧЕСКИХ ЖИДКОСТЕЙ

**Введение.** В диэлектрических дисперсиях возникновение цепочечных структур под воздействием электрического поля впервые было отмечено в работе [1]. Радикальное увеличение вязкости за счет структурных перестроек частиц наполнителя получило название «электровязкий эффект», а позднее, после детальных гидромеханических исследований, показавших также изменение пластичности, упругости, ползучести, – «электрореологический эффект» (ЭРЭ). За более чем 60-летнюю историю исследований физической природы явления учеными и инженерами было установлено, что все реологические эффекты обусловлены поляризацией дисперсных частиц, специфика проявления которой в основном определяется тремя факторами: 1 – типом, количеством используемого наполнителя и его структурным состоянием; 2 – величиной и динамикой электрического воздействия; 3 – параметрами механических сдвиговых режимов. Наибольшие сложности возникли при попытках систематизации и описания экспериментальных результатов, полученных при изучении влияния первого фактора. Так, прежде всего выявлено, что электрореологические жидкости активны, если диэлектрические частицы дисперсной фазы адсорбируют на поверхности некоторое количество влаги или поверхностно-активных веществ (ПАВ). Однако попытки описания природы ЭРЭ в гидросодержащих (оксидных) суспензиях, основанные на учете влияния эффектов «влаги» [2] и роли двойного электрического слоя [3], не объясняли возникновение максимального ЭРЭ лишь при некотором оптимальном содержании адсорбированной воды и его отсутствие в безводных дисперсиях [4, 5]. Эти аргументы способствовали разработке диэлектрической поляризационной модели [6, 7], в соответствии с которой основной вклад в поляризацию частиц должна вносить разница диэлектрических констант дисперсной фазы и дисперсионной среды, т. е. следовало ожидать гигантского эффекта при использовании сегнетоэлектриков. В то же время реологические исследования ЭРЖ на основе частиц титаната бария и других соединений показали, что они слабоактивны в переменном электрическом поле [8], неактивны в постоянном электрическом поле [9] и откликаются на электрическое воздействие также после адсорбирования некоторого количества влаги [10]. Кроме того, количественные несоответствия результатов теоретических предсказаний и экспериментальных данных заставили исследователей предположить, что классическая диэлектрическая поляризационная модель не может объяснить физическую природу ЭРЭ. Позже П. Аттеном была предложена кондукционная модель [11, 12], модифицированная другими исследователями [13–15], основанная на предположении об определяющем влиянии на поляризацию ЭРЖ соотношения проводимостей дисперсной фазы и дисперсионной среды. Принята во внимание также нелинейная зависимость проводимости дисперсионной среды от напряженности электрического поля, показывающая, что для электрореологической активности очень важна неомическая составляющая проводимости. Как установили Б. Хусид и А. Активос в развитие этой модели [16], она учитывает только взаимодействие частиц и не учитывает динамику структурного процесса в ЭРЖ под действием электрического поля, поэтому может быть применима только в случае, когда микроструктура в суспензии полностью сформирована. Экспериментальные результаты последних десятилетий [14, 17, 18] подтвердили релаксационный характер процессов поляризации в ЭРЖ.

В настоящее время в диэлектрических дисперсиях с электрочувствительным наполнителем различают молекулярную поляризацию частиц, которая делится на ориентационную,

связанную с поворотом осей жестких диполей, и деформационную. Последняя представляет собой электронную поляризацию диэлектрика с неполярными молекулами, состоящую в проявлении индуцированного электрического момента, или ионную, возникающую в неполярных диэлектриках за счет смещения ионов решетки в направлении поля. Помимо собственной поляризации материала дисперсных частиц, находящихся в диэлектрической жидкости, важна межфазная поляризация, связанная с появлением двойного электрического слоя (ДЭС) на границе раздела фаз и поляризацией поверхностного слоя активатора и (или) зарядов, адсорбированных из жидкой фазы. Механизм поверхностной поляризации в коллоидных системах проявляется как при отсутствии (пленочная поляризация), так и при наличии обмена ионов между двойным слоем и средой [19]. Таким образом, поляризационный отклик частиц обусловлен их диэлектрическими свойствами, поверхностью и проводимостью.

В настоящее время активные теоретические и экспериментальные исследования по выяснению механизма ЭРЭ проводятся в США, КНР, Великобритании, Франции, Японии. В работах сотрудников Института тепло- и массообмена имени А. В. Лыкова НАН Беларуси [20, 21] показана ошибочность прямого применения диэлектрических подходов, не учитывающих того, что частицы дисперсной фазы в большинстве случаев – это «плохие» диэлектрики, обладающие конечной проводимостью. Кроме того, искусственное разделение двух составляющих поляризационного процесса – кондукционной и диэлектрической – приемлемо лишь для упрощенных теоретических построений, но не характеризует поведение реальных ЭРЖ. Необходимо отметить, что в связи с многофакторностью (различные материалы компонентов, температура, разные сдвиговые условия, частота и величина электрического воздействия) и сложностью описания процессов поляризации в неидеальных диэлектрических дисперсиях ни одна из известных ныне теорий не в состоянии дать строгого объяснения структурным процессам в ЭРЖ и предсказать величину их электрореологического отклика.

Вследствие активного развития золь-гель технологий и создания наноразмерных электрочувствительных частиц, их ансамблей с развитой поверхностью и сложной внутренней структурой остро ощущается недостаток сведений о реологических и электрофизических характеристиках дисперсий на их основе для выяснения и оценки поляризационных механизмов формирования в них высокого электрореологического отклика. Не менее важен и прикладной аспект, обусловленный необходимостью создания управляемых рабочих дисперсий для различных устройств и технологий не только в связи с возможностью уменьшения энергозатрат на их активацию, но и для расширения температурного диапазона использования, в частности в качестве теплоносителя и демпфирующих жидкостей, применение которых в динамических условиях ведет к диссипативному разогреву.

Настоящая работа посвящена изучению гидромеханических (реологических) и электрофизических параметров диэлектрических суспензий на основе дисперсного материала четырех различных типов.

**Экспериментальные результаты.** В опытах определялась зависимость напряжения сдвига  $\tau$  и плотности тока  $j$  от напряженности электрического поля  $E$  при постоянном сдвиге, а также их изменение от времени воздействия электрического поля для суспензий всех типов синтезированных дисперсных наполнителей в минеральном масле. Измерения проводились с помощью ротационного вискозиметра с использованием соосно-цилиндрической ячейки с межэлектродным зазором 1 мм, модифицированной для подключения электрического поля.

**Гидратированные оксиды.** Известно, что увеличение содержания активатора – слабо связанной воды, адсорбированной на поверхности частиц оксидов, выше определенных значений приводит к росту проводимости суспензий и снижает их ЭР-активность. В работе [22] нами показано, что электрореологическая активность гидратированных оксидов и гидратированных солей поливалентных металлов связана с наличием неструктурных молекул межслоевой воды, которые под воздействием электрического поля диссоциируют с появлением подвижных носителей заряда Н-протонов и ОН-групп. Их накопление и разделение зарядов на поверхности частиц дисперсной фазы также обеспечивает межфазную поляризацию. В

отличие от суспензий с активированными адсорбированной водой оксидами в суспензиях на основе наполнителя, частицы которого содержат молекулы межслоевой воды, имеющие прочные водородные связи, можно ожидать высокую ЭР-активность при меньших показателях проводимости.

Для детального рассмотрения особенностей изменения проводимости в суспензиях с межслоевым содержанием воды определены зависимости напряжения сдвига  $\tau$  и плотности тока проводимости  $j$  (рис. 1) суспензий, содержащих 10 и 20 вес.% гидратированного фосфата алюминия ( $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{P}_2\text{O}_5 \cdot 0,5\text{H}_2\text{O}$ ), от напряженности электрического поля  $E$  в диапазоне значений 0–3,5 кВ/мм при скорости сдвига  $\dot{\gamma} = 17,2 \text{ с}^{-1}$ . Изучено также изменение напряжения сдвига и плотности тока в зависимости от времени воздействия электрического поля (рис. 2).

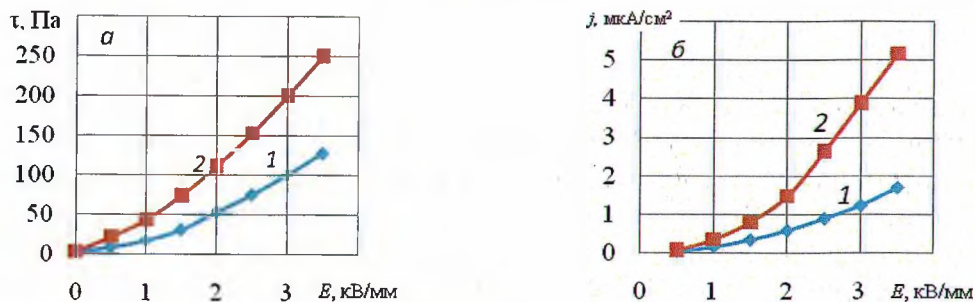


Рис. 1. Зависимости напряжения сдвига  $\tau$  (а) и плотности тока  $j$  (б) суспензий, содержащих различные концентрации фосфата алюминия, от напряженности электрического поля  $E$ : 1 – 10 вес.%; 2 – 20

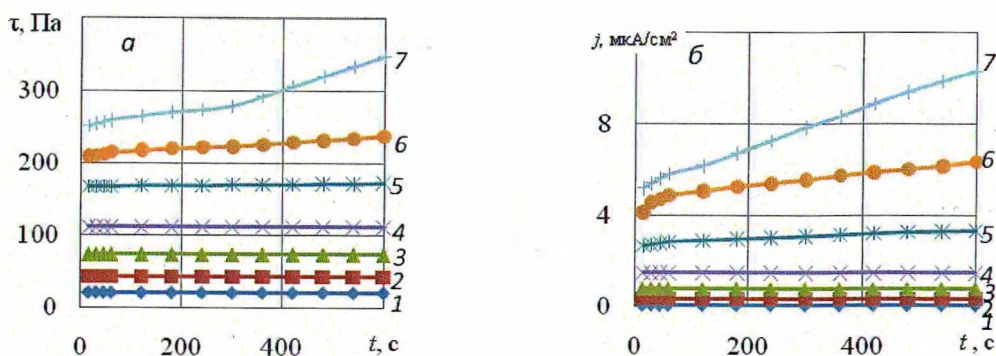


Рис. 2. Зависимости напряжения сдвига  $\tau$  (а) и плотности тока  $j$  (б) суспензий, содержащих 20 вес.% фосфата алюминия, от времени воздействия электрического поля различной напряженности: 1 –  $E = 0,5$  кВ/мм, 2 – 1,0; 3 – 1,5; 4 – 2,0; 5 – 2,5; 6 – 3,0; 7 – 3,5

Частицы наполнителя имели моноклинную структуру (минералогическое название метаварисцит,  $\epsilon = 3,0$ ) и были синтезированы золь-гель методом и высушены при  $T = 90^\circ\text{C}$ . Анализ потери массы образца наполнителя (рис. 3, кривая 1) показывает, что в его составе половина воды – слабосвязанная (поверхностная), исчезающая при  $100^\circ\text{C}$ , оставшаяся часть – межслоевая, количество которой плавно уменьшается в диапазоне  $100\text{--}500^\circ\text{C}$ .

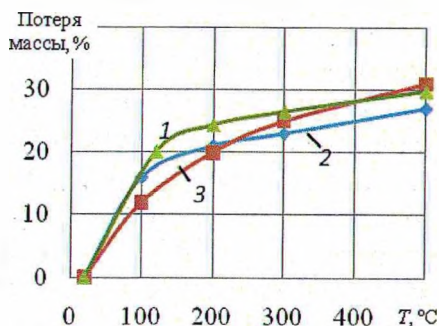


Рис. 3. Потеря массы образцами при термообработке: 1 – фосфат алюминия; 2 –  $\text{TiO}_2$ ; 3 –  $\text{TiO}_2/\text{KMЦ}$

Видно, что суспензии проявляют высокую ЭР-активность и при этом обладают низкими значениями плотности тока, что связано с прочностью водородных связей межслоевой воды с поверхностью частиц фосфата алюминия. Стабильные во времени реологические свойства суспензий в электрическом поле поддерживаются во всем диапазоне напряженности поля. Повышение напряженности электрического поля вызывает слабый рост значений удельного тока проводимости и соответствующее изменение величины напряжений сдвига суспензий во времени.

Дисперсная фаза с высокой диэлектрической постоянной. Для создания ЭРЖ перспективным материалом является диоксид титана  $\text{TiO}_2$ , имеющий высокую диэлектрическую постоянную ( $\epsilon = 86\text{--}173$ ). Однако он имеет небольшую удельную поверхность ( $S_{\text{уд}} = 37 \text{ м}^2/\text{г}$ ), и суспензии на его основе не проявляли значительного ЭРЭ в обычном состоянии из-за значительного роста тока проводимости, характерного для активированных водой оксидов. Эффективный способ моделирования ЭР-активности  $\text{TiO}_2$  – применение метода золь-гель синтеза для увеличения активной поверхности и создание на его основе органо-неорганических композитных материалов. Для исследования получены диоксид титана  $\text{TiO}_2$  с развитой поверхностью ( $S_{\text{уд}} = 176 \text{ м}^2/\text{г}$ ) и гибридный материал  $\text{TiO}_2$ /карбоксиметилцеллюлоза (КМЦ), содержащий 14,8 мас.% КМЦ. Образцы высушены при температуре  $70^\circ\text{C}$  до постоянного веса. По результатам рентгеноструктурного анализа установлено, что полученные образцы – аморфные.

Проведенный термический анализ порошков фосфата алюминия,  $\text{TiO}_2$  и  $\text{TiO}_2$ /КМЦ указывает на то, что уменьшение массы  $\text{TiO}_2$  в большей степени связано с удалением адсорбированной воды (60 об.%), а  $\text{TiO}_2$ /КМЦ – как с удалением адсорбированной воды (39 об.%), так и с выгоранием КМЦ и частичным протеканием процесса химической дегидратации в интервале температур  $200\text{--}500^\circ\text{C}$ .

Из рис. 4 (кривые 1, 3) видно, что суспензии, содержащие 10 вес.%  $\text{TiO}_2$ /КМЦ и 10 вес.%  $\text{TiO}_2$ , проявляют высокую ЭР-активность. Однако большие значения плотности тока в суспензии с  $\text{TiO}_2$ , обусловленные слабой связью адсорбированной воды с поверхностью частиц, не позволяют увеличивать напряженность электрического поля выше  $2 \text{ кВ/мм}$ , которой соответствует величина напряжения сдвига, равная  $125 \text{ Па}$  (рис. 4, кривая 3), и создавать эффективные рабочие рецептуры суспензий с более высоким содержанием дисперсной фазы. Зависимость  $j(E)$  суспензии, содержащей  $\text{TiO}_2$ /КМЦ, говорит о более сильной связи адсорбированной воды с поверхностью частиц, что подтверждается ее большей поляризацией и, соответственно, более высоким откликом на воздействие электрического поля ( $200 \text{ Па}$ ), при этом величина тока оказывается меньше в три раза. Это позволяет получать для составов ЭРЖ с 10%-м содержанием  $\text{TiO}_2$ /КМЦ такой же высокий электрореологический отклик ( $200 \text{ Па}$ ), как и для 20%-х, но при меньших энергетических затратах ( $j(E) = 20 \text{ мкА/см}^2$ ). Сравнение 10 и 20%-х суспензий показывает, что изменяется характер роста тока во времени (рис. 5, 6) при разных значениях напряженности электрического поля (порог активации).

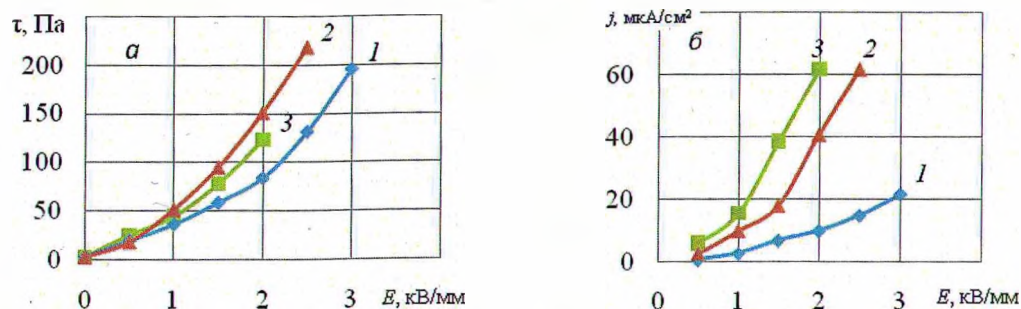


Рис. 4. Зависимости напряжения сдвига  $\tau$  (а) и плотности тока  $j$  (б) от напряженности электрического поля  $E$  суспензий, содержащих: 1 – 10 вес. %  $\text{TiO}_2$ /КМЦ; 2 – 20 вес. %  $\text{TiO}_2$ /КМЦ; 3 – 10 вес. %  $\text{TiO}_2$  при  $\dot{\gamma} = 17.2 \text{ с}^{-1}$

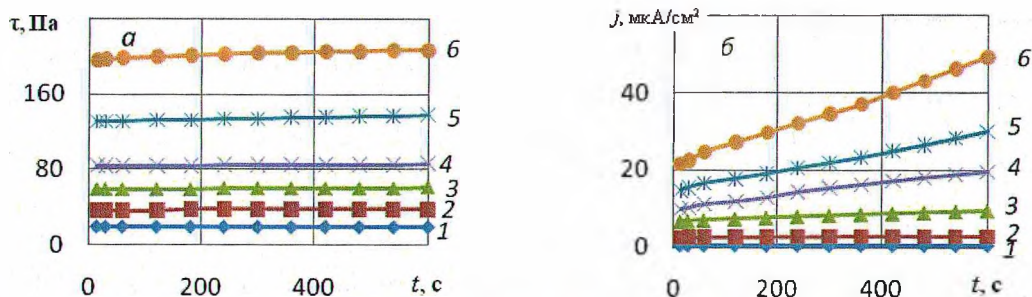


Рис. 5. Зависимости напряжения сдвига  $\tau$  (а) и плотности тока  $j$  (б) суспензии, содержащей 10 вес.%  $\text{TiO}_2/\text{КМЦ}$ , от времени воздействия электрического поля: 1 –  $E = 0,5$  кВ/мм; 2 – 1,0; 3 – 1,5; 4 – 2,0; 5 – 2,5; 6 – 3,0

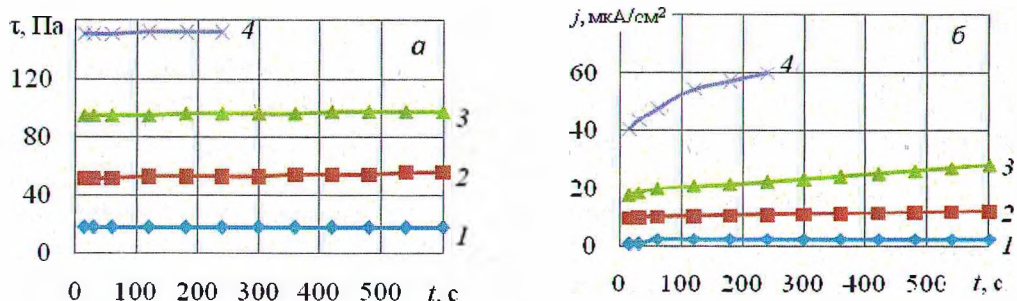


Рис. 6. Зависимости напряжения сдвига  $\tau$  (а) и плотности тока  $j$  (б) суспензии, содержащей 20 вес.%  $\text{TiO}_2/\text{КМЦ}$ , от времени воздействия электрического поля: 1 –  $E = 0,5$  кВ/мм; 2 – 1,0; 3 – 1,5; 4 – 2,0

**Легированные материалы.** Известно, что одним из методов повышения электрореологической активности  $\text{TiO}_2$ , имеющего кристаллическую решетку «анатаз», является допирование ионами металлов, что приводит к образованию дефектов кристаллической решетки и ион-легированию поверхностных структур [23]. В БГТУ были синтезированы образцы  $\text{TiO}_2$ , легированные алюминием ( $\text{TiO}_2 + 7\% \text{Al}$ ) [24]. Поскольку катионы  $\text{Al}^{+3}$  сопоставимы по величине ионного радиуса с катионами  $\text{Ti}^{+4}$  (0,054 и 0,061 нм соответственно), предполагается возможность частичного замещения катиона  $\text{Ti}^{+4}$  на  $\text{Al}^{+3}$  в узлах кристаллической решетки. При гетеровалентном легировании возможны изменения концентрации свободных носителей заряда. В нашем случае при расположении Al в узлах решетки  $\text{TiO}_2$  концентрация свободных электронов должна уменьшиться. Если примесь находится в междоузлиях, то концентрации свободных электронов растет, примесь становится центром рассеяния зарядов и может снижать их подвижность, что должно привести к изменению показателей тока. Для увеличения площади поверхности и создания нанопористой структуры композитного материала использовали структурообразователь (полиэтиленгликоль). Высушенные при температуре  $T = 120^\circ\text{C}$  образцы были отожжены при  $600^\circ\text{C}$  в течение  $t = 3$  ч, что полностью исключало наличие в них воды. Удельная площадь поверхности полученных образцов  $S_{\text{уд}} = 114 \text{ м}^2/\text{г}$ . Как показали результаты рентгеноструктурного анализа, синтезированные образцы имеют кристаллическую структуру «анатаз».

Определены зависимости напряжения сдвига  $\tau$  (а) и плотности тока  $j$  (б) от напряженности электрического поля  $E$  дисперсий, содержащих различные весовые концентрации композитного материала  $\text{TiO}_2$ , легированного алюминием (рис. 7). Из рисунка видно, что для суспензий, содержащих легированный  $\text{TiO}_2$ , не имеющих адсорбционного переноса зарядов, удалось получить такие же высокие значения реологических показателей, как и в случаях, рассмотренных выше. Так, для суспензии ( $C = 20\%$ ) напряжение сдвига составляет 225 Па, что соответствует значению отклика 20% суспензии  $\text{TiO}_2/\text{КМЦ}$  при той же напряженности поля, однако при меньших на 1/3 значениях плотности тока.

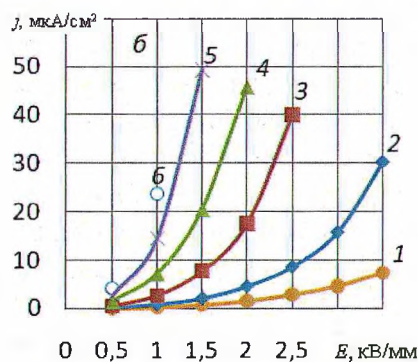
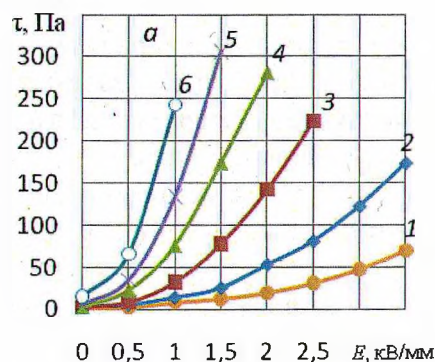


Рис. 7. Зависимости напряжения сдвига  $\tau$  (а) и плотности тока  $j$  (б) суспензий различных концентраций, содержащих  $\text{TiO}_2$ , модифицированный Al, от напряженности электрического поля  $E$  при скорости сдвига  $\dot{\gamma} = 17,2 \text{ с}^{-1}$ : 1 – 5%; 2 – 10; 3 – 20; 4 – 30; 5 – 40; 6 – 50

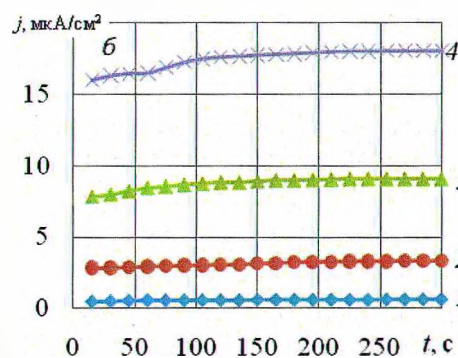
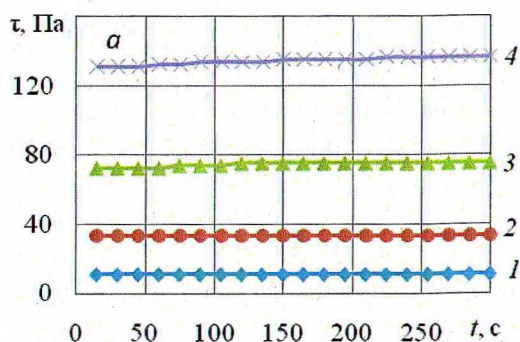


Рис. 8. Зависимости напряжения сдвига  $\tau$  (а) и плотности тока  $j$  (б) суспензии, содержащей 20 вес.%  $\text{TiO}_2$ , модифицированного Al, от времени воздействия электрического поля различной напряженности: 1 –  $E = 0,5 \text{ кВ/мм}$ ; 2 – 1,0; 3 – 1,5; 4 – 2,0

Результаты свидетельствуют о том, что напряжение сдвига и плотность тока суспензий, содержащих  $\text{TiO}_2$ , легированный Al, значительно увеличиваются с ростом интенсивности электрического воздействия и концентрации дисперсной фазы. Кроме того, при одной и той же концентрации дисперсной фазы, например 20 вес.% и напряженности электрического поля  $E \geq 1,5 \text{ кВ/мм}$ , ток так же, как и для суспензии с  $\text{TiO}_2/\text{КМЦ}$ , перестает быть стабильным и увеличивается во времени, но значительно менее интенсивно (рис. 6, 8).

**Заключение.** Исследование проводимости и электрореологического отклика показало, что суспензии, содержащие различную ЭР-активную дисперсную фазу: с протонным типом проводимости (три образца – гидратированный фосфат алюминия, диоксид титана и гибридный материал  $\text{TiO}_2/\text{КМЦ}$ ) и электронным переносом зарядов –  $\text{TiO}_2$ , легированный алюминием, имеют качественно подобный характер зависимостей напряжения сдвига и плотности тока от напряженности электрического поля и времени его воздействия.

Среди материалов первой группы выделяются дисперсии на основе гидратированного оксида, в которых наличие межслоевой воды, достаточно жестко связанной за счет координационных и водородных связей с элементами структуры фосфата алюминия, обеспечивает высокую ЭР-активность материала с наименьшими показателями проводимости и наибольшей стабильностью результатов. Для суспензий с  $\text{TiO}_2$  аморфной структуры, полученных золь-гель синтезом, особенности переноса заряда, связанные с миграцией протона из внутренних слоев материала дисперсной фазы при небольшой высоте потенциального барьера, и наличие подвижности протонов при слабой связи адсорбированной на поверхности воды вызывают появление большого тока проводимости, что не позволяет осуществить их эффективное использование. При более прочной связи адсорбированной воды с гибридным материалом  $\text{TiO}_2/\text{КМЦ}$  в тех же условиях удастся обеспечить более высокие значения электро-

реологического отклика суспензий, однако ток остается стабильным во времени только до определенного порога ( $E < 1,5$  кВ/мм), что ограничивает диапазон их управляемости.

Безводный оксид титана, легированный алюминием, имеющий кристаллическую решетку «анатаз», обладает электронной проводимостью, высота потенциального барьера при миграции электронов обеспечивает малые значения тока проводимости в суспензии на его основе. При увеличении напряженности электрического поля и концентрации дисперсной фазы снижается стабильность характеристик суспензии из-за высокой подвижности электронов. Дальнейшее совершенствование режимов синтеза легированных материалов со структурой «анатаз» позволит получить перспективный материал дисперсной фазы для безводных электрореологических суспензий и расширить возможности их применения.

## Литература

1. Branly E. Variations de conductibilite sous diverses influences electriques // *Compt. Rend.* 1891. Vol. 112. Pp. 785–787.
2. Klaas D. L., Martinek T. W. Electroviscous Fluids I and II; Rheological Properties; Electrical Properties // *J. Appl. Phys.* 1967. Vol. 1, No. 38. Pp. 67–80.
3. Stangroom G. Electrorheological Fluids // *J. Phys. Techn.* 1983. No. 14. Pp. 290–296.
4. Block H., Kelly J. P., Qin A., Watson T. Materials and mechanisms in electrorheology // *Langmuir*. 1990. No. 6. Pp. 6–14.
5. Filisko F. E., Radzilowski L. H. An intrinsic mechanism for the activity of alumo-silicate based electrorheological materials // *J. Rheol.* 1990. Vol. 4, No. 34. P. 539.
6. Klingenberg D. J., Zukoski C. F. Studies on the Steady-Shear Behavior of the Electrorheological Suspensions // *Langmuir*. 1990. No. 6. Pp. 15–24.
7. Davis L. C. Polarization forces and conductivity effects in electro-rheological fluids // *J. Appl. Phys.* 1992. Vol. 4, No. 72. Pp. 1334–1340.
8. Garuino T., Adolf D., Hance B. The effect of solvent and particle dielectric constants on the electrorheological properties of water-free fluids // *Proc. of the Int. Conf. on Electrorheological Fluids*, Oct. 15–16, 1991, Carbondale, Illinois, USA / Ed. R. Tao. Singapore: World Scientific Publishing Co., 1992. Pp. 167–174.
9. Otsubo Y., Watanabe K. Electrorheological behavior of barium titanate suspensions // *J. Soc. Rheol. Japan*. 1990. No. 18. Pp. 111–116.
10. Zukoski C. F. Material properties and the electrorheological response // *Ann. Rev. Mater. Sci.* 1993. No. 23. Pp. 45–78.
11. Atten P., Foulc J.-N., Felici N. A conduction model of the electrorheological effect // *Int. J. Mod. Phys. B*. 1994. No. 8. Pp. 2731–2745.
12. Foulc J.-N., Atten P., Felici N. Macroscopic model of interaction between particles in an electrorheological fluid // *J. Electrostatics*. 1994. No. 33. Pp. 103–112.
13. Tang X., Wu C., Conrad H. On the conductivity model for the electrorheological effect // *J. Rheol.* 1995. Vol. 5, No. 39. Pp. 1059–1073.
14. Tang X., Conrad H. The role of dielectric relaxation in transient electrorheological response // *J. Appl. Phys.* 1996. No. 81. Pp. 5240–5247.
15. Wu C. W., Conrad H. A modified conduction model for the electrorheological effect // *J. Phys. D: Appl. Phys.* 1996. No. 29. Pp. 3147–3153.
16. Khusid B., Acrivos A. Effect of conductivity in electric-field-induced aggregation in electrorheological fluids // *Phys. Rev. E*. 1995. Vol. 52, No. 2. Pp. 1669–1693.
17. Ma H., Wen W., Tam W. Y., Sheng P. Frequency Dependent Electrorheological Properties: Origin and Bounds // *Phys. Rev. Lett.* 1996. Vol. 12, No. 77. Pp. 2499–2502.
18. Wen W., Ma H., Tam W. Y., Sheng P. Frequency and Water Content Dependencies of Electrorheological Properties // *Phys. Rev. E*. 1997. Vol. 2, No. 55. Pp. 1294–1297.

19. Духин С. С. Электропроводность и электрокинетические свойства дисперсных систем. Киев: Наукова думка, 1975. С. 246.
20. Коробко Е. В. Электроструктурированные (электрореологические) жидкости: особенности гидромеханики и возможности использования: Минск: АНК ИТМО АНБ, 1996. – 100 с.
21. Korobko E. V. Physicochemical Aspects of Forming the ERF // Int. J. of Modern Physics. B, 1998. Vol. 13, No. 15. Pp. 87–97.
22. Korobko E. V., Eshenko L. S., Bedik N. A. Peculiarities of particle polarization in water containing fillers for ERF // J. of Physics: Conference Series. 2009. Vol. 149. P. 012018.
23. Shang Y. L., Jia Y. L., Liao F. H., Li J. R., Li M. X., Wang J., Zhang S. H. Preparation, microstructure and electrorheological property of nano-sized  $\text{TiO}_2$  particle materials doped with metal oxides // J. of Materials Science. 2007. Vol. 42. Pp. 2586–2590.
24. Мурашкевич А. Н., Алисиенок О. А., Жарский И. М., Коробко Е. В. Использование модифицированного диоксида титана и титансодержащих композитов в качестве наполнителей, обладающих электрореологическим эффектом // Неорганические материалы. 2013. Т. 49, № 2. С. 158–164.