

12,13

## Анализ структурного взаимодействия электрически активных гетерогенных мелкодисперсных систем на границах раздела твердой и жидкой фаз

© Л.А. Щербаченко, Н.Т. Максимова, С.С. Барышников, В.А. Карнаков, С.Д. Марчук, Л.И. Ежова

Иркутский государственный университет,  
Иркутск, Россия

E-mail: Natmax\_2001@mail.ru

(Поступила в Редакцию 25 августа 2010 г.  
В окончательной редакции 24 декабря 2010 г.)

В электрически активных гетерогенных мелкодисперсных системах на границах раздела жидкой и твердой фаз обнаружено наличие значительных электрических сил, приводящих к возникновению градиентов потенциала собственного внутреннего электрического поля, способного обеспечивать циркуляцию токов в таких системах. Зарегистрировано появление двойного электрического слоя, являющегося новой, характерной для электрически активных систем фазой структурообразования. Механизм формирования двойного электрического слоя включает электрореконтактное взаимодействие поверхностей двух разнородных жидких и твердых полярных диэлектриков.

Работа выполнена в рамках программы „Развитие научного потенциала высшей школы (2009–2010 гг.)“, АВЦП, № 2.1.1/3297.

### 1. Введение

Электрически активные дисперсные системы с развитой удельной поверхностью являются одним из наиболее перспективных классов современных материалов. Особые механические и электрофизические свойства этих систем во многом определяются методами их получения и в значительной степени зависят от дисперсности, концентрации, а также химического взаимодействия входящих в их структуру компонентов. В последнее время заметное внимание уделяется исследованию дисперсных систем на основе слоистых алюмосиликатов, среди которых наиболее ярким представителем является слюда [1–5]. Для воды в таких веществах характерно адсорбированное состояние. Наличие и количество воды в межслоевом пространстве слюды не влияет на структуру решетки алюмосиликата. В то же время состояние молекул воды в межслоевом пространстве по характеру взаимодействия с ближайшим окружением может быть различным. Сложность строения дисперсных систем на основе слоистых алюмосиликатов, а также наличие локальных неоднородностей определяют причину отсутствия сложившегося представления о механизмах переноса носителей заряда и о структуре энергетического спектра таких систем.

В двухфазной системе, содержащей поверхностно-активные мелкоразмерные частицы слюды, погруженные в водную матрицу, на межфазных границах возникает интенсивное кулоновское взаимодействие. Заряды, находящиеся на электрически активной поверхности частиц слюды, взаимодействуют с полярными молекулами и ионами водной пленки [2]. При наличии многочисленных границ раздела в этих сложных дисперсных системах

суммарный эффект межфазных взаимодействий становится особенно сильным и является определяющим для процесса генерации собственных электрических полей. Такое взаимодействие приводит к возникновению в системе электрических сил и, как следствие, к градиентам потенциала внутреннего собственного электрического поля. Источниками внутреннего поля являются заряженные дефекты, локализованные на различных энергетических уровнях, как на поверхности, так и в объеме твердой компоненты, а также свободные ионы и полярные молекулы жидкости [6,7].

Для достижения наиболее интенсивного взаимодействия поверхностных зарядов слюдяной частицы с ионами и полярными молекулами водной пленки используется ударная механоактивация. Этот метод позволяет измельчением частиц слюды увеличивать их поверхностную активность. Как известно, механоактивация является одним из приоритетных направлений в области разработки методов получения и создания материалов с высоким уровнем дисперсности и с новыми свойствами, связанными с разрывами межатомных связей и появлением заряженных дефектов на поверхности и в объеме ультрадисперсных частиц. При этом активность частиц с развитой поверхностью значительно увеличивается, что естественным образом сказывается на эффективности взаимодействия ее с полярными молекулами жидкой компоненты.

Основные компоненты, входящие в состав слюды, это кремний, кислород, алюминий, магний, калий, водород. Кроме основных в состав слюд входят еще более 30 химических элементов, причем некоторые из них присутствуют в весьма малых количествах. При механоактивации слюд преимущественно рвутся связи Al–O, Si–O

и К–О. В связи с этим на поверхности мелкоразмерных частиц обнажаются ионы калия, магния, кислорода и, частично, алюминия и кремния. Так как энергия валентных связей К–О мала, катионы калия и магния с наполовину компенсированным зарядом будут непрочно удерживаться поверхностью слюдяной частицы, а их плоскость спайности будет выполнена анионами кремнекислородных тетраэдров. На торцевых участках поверхности частиц присутствуют ионы алюминия, кислорода и частично кремния. Все эти заряды создают электрическую активность поверхности ультратонких частиц [8,9].

Все разновидности ультрадисперсных систем в силу условий их получения, особенностей химического состава и структуры являются неравновесными макросистемами. Хотя суммарный заряд всей рассматриваемой дисперсной системы, как и нейтрального кристалла слюды, равен нулю, в новых условиях после механической обработки дефекты твердой фазы приобретают заряд, и в связи с неравновесностью такой системы появляется способность электрических дефектов к эффективной адсорбции полярных молекул из окружающей среды. Водная компонента состоит из полярных молекул с ионными связями и, таким образом, внутреннее поле выступает в роли катализатора процессов диссоциации полярной жидкости и способствует увеличению в ней концентрации свободных зарядов. Смещение свободных заряженных частиц в жидкой полярной компоненте под действием устойчивого внутреннего поля в новые энергетически более выгодные позиции закрепления обеспечивает как миграцию ионов к активной поверхности твердой фазы, так и их накопление в объеме электрически активной системы [10,11]. Интенсивное накопление свободных зарядов жидкой и твердой компонентами свидетельствует о проявлении электретных свойств, что позволяет придавать таким активным системам свойства электрического аккумулятора.

Целью работы являлось изучение механизма межфазного взаимодействия в гидратированных мелкоразмерных механоактивированных слюдах и особенностей генерации и реализации образующейся в результате этого взаимодействия внутренней электрической энергии. Особое внимание уделено исследованию процессов формирования и стабилизации новой структуры на межфазных границах исследуемой системы.

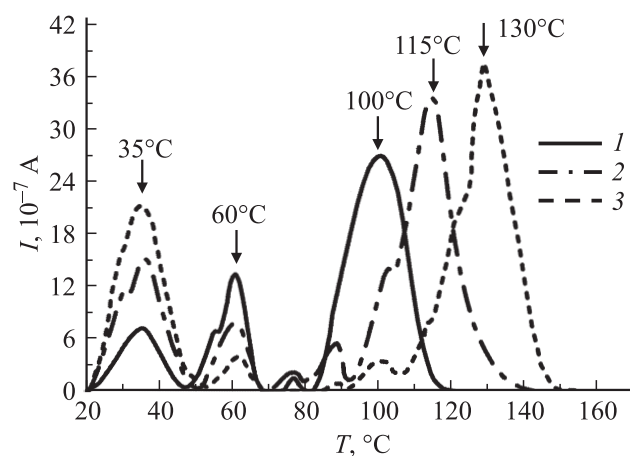
## 2. Методика

Для изучения механизма межфазного взаимодействия использован метод термостимулированной спектроскопии. Экспериментальные образцы были приготовлены посредством механоактивации природных кристаллов флогопита в установке „Pulverisette 5“, с помощью которой были получены дисперсные системы с размерами частиц в интервале от 10 до 1000 нм. Гранулометрический состав гетерогенных систем исследовался более детально с помощью лазерного анализатора ча-

стиц „MicroSizer 201“. Для получения заданных величин адсорбции образцы выдерживались во влажной среде эксикатора с насыщенным раствором кальцинированной соды  $\text{Na}_2\text{CO}_3$ . Подготовленные таким образом объекты представляли собой двухкомпонентные гетерогенные системы, в которых жидкая фаза контактирует с заряженной поверхностью твердой среды. Образцы исследуемой системы с фиксированной массой помещались в специально сконструированную измерительную ячейку, представляющую собой плоский конденсатор с алюминиевыми электродами диаметром 1.5 см. Напряжение на электроды измерительной ячейки не подавалось. В связи с этим в эксперименте наблюдались процессы, происходящие только под действием внутреннего электрического поля. Регистрация термостимулированных токов (ТСТ) производилась при линейном нагреве образца с постоянной скоростью  $1^\circ\text{C}/\text{min}$  в интервале температур от 20 до  $160^\circ\text{C}$ . Низкая скорость нагрева обеспечивала отсутствие градиентов температуры в образце, что являлось необходимым условием получения информативных и достоверных токовых спектров. Термостимулированные токи регистрировались в режиме короткозамкнутого образца с помощью чувствительного вольтметр-электрметра В7-49 (погрешность измерения тока  $10^{-15}$  А). Полученные данные поступали в память персонального компьютера с аналого-цифрового преобразователя и обрабатывались стандартными статистическими методами.

## 3. Экспериментальные результаты и их обсуждение

На рис. 1 представлены термограммы механоактивированного мелкоразмерного флогопита, погруженного в водную пленку. В области температур  $20\text{--}160^\circ\text{C}$  наблюдалось несколько доминирующих максимумов, связанных как с объемными, так и с поверхностными



**Рис. 1.** Спектры ТСТ мелкоразмерного флогопита дисперсностью  $20\text{--}32\ \mu\text{m}$  для величины адсорбции 10.2 (1), 21.6 (2) и 32.4% (3).

процессами релаксации заряда [6,12]. Прослеживаются две температурные области. В интервале 20–80°С максимумы при  $T_1 = 35^\circ\text{C}$  и  $T_2 = 60^\circ\text{C}$  могут быть связаны как с накоплением межфазных свободных зарядов под действием внутреннего поля электрически активной системы, так и с особенностями структуры водной компоненты. Температурное положение этих пиков неизменно и не зависит от размеров частиц твердой фазы и величины адсорбции. Такие максимумы характерны как для неорганических, так и для органических коллоидных систем [6,13]. В области 80–160°С релаксация термостимулированного тока, вероятно, связана с термическим освобождением ионов из дефектных областей поверхности и объема мелкодисперсных частиц слюды.

При низких температурах под действием собственного внутреннего поля двухфазной системы происходит преимущественно ионизация полярных молекул воды с ионными связями. Согласно теории Пула–Френкеля [14], электрическое поле способствует уменьшению энергии ионизации полярных молекул, что приводит к диссоциации молекул жидкой фазы и связанному с ней увеличению концентрации свободных ионов  $n_i$ .

$$n_i = n \exp\left(-\frac{U_0}{kT}\right) \exp\left(\frac{a\sqrt{E}}{kT}\right), \quad (1)$$

где  $n_i$  — постоянная Лошмидта жидкой среды,  $U_0$  — энергия, необходимая для диссоциации молекул в отсутствие электрического поля,  $E$  — напряженность внутреннего поля,  $a$  — постоянная, зависящая от структуры жидкости. Следовательно, в низкотемпературной области преобладающими источниками направленно движущихся зарядов являются процессы диссоциации в полярной водной компоненте. Диссоциация полярных молекул воды в окрестности 35°С в основном происходит под действием градиентов потенциала собственного внутреннего поля, поскольку при таких низких температурах энергии теплового движения молекул недостаточно.

Рассчитаны электрофизические параметры электретного состояния мелкоразмерного флоготипа (см. таблицу). По спектрам ТСТ вычислены энергия активации носителей заряда  $U_i = \frac{k[T_{i,\max}]^{-2}}{\Delta T_i}$  и плотности электретных зарядов  $\sigma_i = \frac{1}{S\beta} \int I(T)dT$ . Положение пикового максимума тока  $T_{i,\max}$  и его ширина  $\Delta T_i$  определяются экспериментально, где  $S$  — площадь электрода,  $\beta$  — скорость нагрева,  $T(K)$  — температура,  $I$  — величина тока,  $k$  — постоянная Больцмана,  $\Delta T_i$  — ширина температурного интервала максимума термоактивационного тока. Данные параметры позволяют оценить релаксационные характеристики термостимулированных токов в изучаемой гетерогенной системе.

Максимум релаксационного тока ( $2.1 \cdot 10^{-7}$  А) при 35°С для образцов гидратированного мелкоразмерного механоактивированного флогопита с величиной адсорбции 32.4% более чем в 3 раза превышает аналогичный

Электрофизические параметры электретного состояния мелкоразмерного флогопита с различной величиной адсорбции

Величина адсорбции $\varphi$ , %	Номер максимума	$T_{\max}$ , °С	$U$ , eV	$\sigma$ , с/м <sup>2</sup>
$\varphi_1 = 10.2$	1	35	0.37	0.33
	2	60	0.34	0.36
	3	100	0.38	0.42
$\varphi_2 = 21.6$	1	35	0.36	0.38
	2	60	0.40	0.37
	3	115	0.47	0.44
$\varphi_3 = 32.4$	1	35	0.26	0.42
	2	60	0.42	0.38
	3	130	0.35	0.47
$\varphi_4 = 101.2$	1	32	0.22	0.46
	2	65	0.43	0.39
	3	90	0.46	0.49
	4	142	0.48	0.54

максимум для образцов с адсорбцией 10.2% водной компоненты. Этот факт свидетельствует о наличии значительно большей концентрации свободных электретных зарядов, накопленных на межфазных границах и в объеме системы. Подтверждением этого является увеличение плотности заряда  $\sigma_3$ , вычисленной по профилю термостимулированных спектров. Плотность накопленного электретного заряда  $\sigma_3 = 0.42$  С/м<sup>2</sup> на межфазных границах двухфазной системы с величиной адсорбции водной компоненты  $\varphi_3 = 32.4\%$  в 1.4 раза превышает плотность свободно накопленного заряда в системе при величине адсорбции  $\varphi_1 = 10.2\%$ . Следовательно, процесс накопления свободных зарядов на межфазных границах системы происходит наиболее интенсивно при большей величине адсорбции, о чем свидетельствует увеличение амплитуды термотока при 35°С (рис. 1, кривая 3). Уменьшение амплитуды аналогичного термотока в образце с меньшей величиной адсорбции водной компоненты ( $\varphi_1 = 10.2\%$ ) при температуре 35°С (рис. 1, кривая 1) демонстрирует минимальную концентрацию объемной воды. С увеличением водной фазы в системе от  $\varphi_1 = 10.2\%$  до  $\varphi_3 = 32.4\%$  энергия активации при температуре 35°С уменьшается от 0.37 до 0.26 eV. Факт уменьшения энергии активации указывает на возможность более интенсивного выхода накопленных гетерозарядов в каналы ионной проводимости в окрестности этой температуры. Таким образом, влияние роста величины адсорбции на динамику процессов электропереноса в электроактивной системе проявляется в значительном увеличении интенсивности максимума ТСТ при 35°С и связано с обеспечением более свободного транспорта ионов жидкой среды к электродам.

Максимум термотока при температуре 60°С (рис. 1) связан с перестройкой структурированной воды в объемное состояние. На это указывают многочисленные экспериментальные работы [10,11,15]. При этой температуре

происходит тепловое разрушение упорядоченной структуры связанных слоев водной пленки, а направление диполей молекул в них становится хаотическим, что приводит к значительному уменьшению потенциального барьера, удерживающего рассматриваемые заряды вблизи поверхности [16]. Наибольшая амплитуда пика ТСТ при этой температуре (рис. 1, кривая 1) может быть объяснена интенсивным проявлением свойств структурированной воды из-за уменьшения концентрации водной компоненты в системе. Наибольшая интенсивность термотока при температуре 60°C наблюдается при величине адсорбции  $\varphi_1 = 10.2\%$ . Следовательно, можно ожидать, что концентрация связанной воды будет максимально проявляться при меньшей величине адсорбции водной компоненты. С увеличением водной компоненты в исследуемой двухфазной системе уменьшение амплитуды максимума тока при 60°C (рис. 1, кривые 2 и 3) объясняется уменьшением концентрации связанной, структурированной воды в объеме жидкой фазы.

Таким образом, максимум тока в окрестности температуры 60°C характеризует наличие в исследуемой системе связанной воды, которая при этой температуре переходит в обычное объемное состояние. Исходная концентрация связанной воды определяется амплитудой этого максимума тока. Эффективность кластеризации структуры полярной воды напрямую связана с активностью поверхности твердой фазы, с которой жидкая полярная фаза взаимодействует. Наиболее сильное межфазное взаимодействие отмечается в таких электроактивных системах, где концентрация связанной, структурированной воды будет наибольшая и, как следствие, амплитуда пикового тока при 60°C максимальна.

Подтверждением эффективности межфазного взаимодействия является повышение энергии активации носителей заряда в указанной области температур от 0.34 до 0.42 eV при повышении величины адсорбции от 10.2 до 32.4% (см. таблицу), что обусловлено увеличением энергии закрепления зарядов за счет их взаимодействия с активной поверхностью твердой фазы. Вероятность термического выхода таких зарядов невелика. Значительная амплитуда максимума термотока может быть объяснена наличием большой концентрации потенциальных ловушек, содержащих термоактивационные заряды.

В интервале температур от 80 до 160°C имеется максимум тока, который в отличие от низкотемпературных максимумов проявляет зависимость от величины адсорбции и поверхностной активности мелкоразмерных частиц слюды. Появление этого максимума связано с освобождением ионов из дефектных областей, расположенных на поверхности и в объеме частиц слюды. Значительная амплитуда релаксационного максимума тока ( $\approx 10^{-6}$  А) обусловлена большой концентрацией накопленных зарядов на межфазных границах.

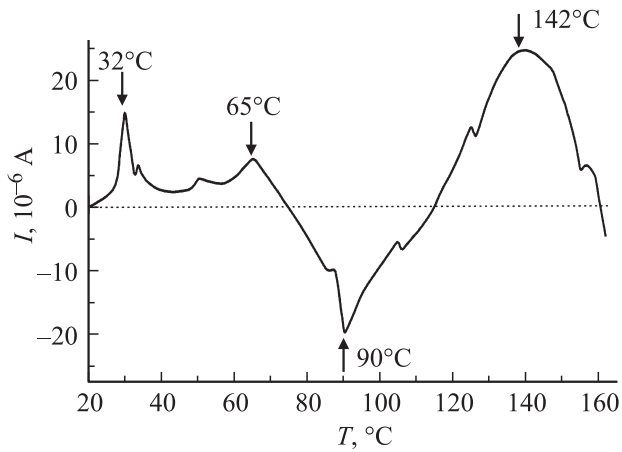
Увеличение содержания водной компоненты от  $\varphi_1 = 10.2\%$  до  $\varphi_3 = 32.4\%$  с ростом температуры (80–160°C) приводит к расширению каналов ионной

проводимости и обеспечению их способности пронизывать весь объем образца. При этом происходит перемещение значительно большей части термически освобожденных заряженных компонентов до электродов ячейки, что и объясняет рост ТСТ в этом диапазоне (рис. 1, кривые 1–3). Этот факт подтверждается увеличением плотности заряда от  $\sigma_1 = 0.42 \text{ C/m}^2$  до  $\sigma_3 = 0.47 \text{ C/m}^2$  при повышении концентрации водной фазы от  $\varphi_1 = 10.2\%$  до  $\varphi_3 = 32.4\%$  и уменьшением энергии активации носителей заряда от  $U_1 = 0.38 \text{ eV}$  до  $U_3 = 0.35 \text{ eV}$ .

Обнаружено, что при одинаковой величине дисперсности в образцах механоактивированных мелкоразмерных частиц слюды максимум ТСТ сдвигается в область более высоких температур для объектов с большей адсорбцией. Этот факт можно интерпретировать следующим образом. Образованные в процессе диссоциации свободные ионы в результате кулоновского взаимодействия с активными поверхностными центрами частиц слюды накапливаются на межфазных границах жидкой и твердой компонент. Процессы накопления свободных ионов сопровождаются частичным экранированием электрического поля поверхностных центров. Экранированные заряды, находящиеся на электрически активной поверхности твердой компоненты, происходит более эффективно при большей концентрации водной фазы. Это приводит к ослаблению суммарного электрического собственного поля системы. И наоборот: низкая концентрация величины адсорбции водной фазы незначительно изменяет величину суммарного внутреннего поля. Энергия активации заряженных дефектов, находящихся на активной поверхности и в объеме механоактивированной мелкоразмерной слюды, является результирующей функцией энергии электрического и теплового поля.

В связи с этим можно полагать, что при низкой величине адсорбции суммарное собственное электрическое поле системы способствует уменьшению энергии активации заряженных дефектов твердой фазы и облегчает их выход с поверхности и из объема частиц слюды в каналы ионной проводимости. Как следствие, облегченный электрическим полем выход ионов с поверхности частиц слюды осуществляется при более низкой температуре. Так, при величине адсорбции водной фазы  $\varphi_1 = 10.2\%$ , максимум высокотемпературного пика проявляется при  $T_1 = 100^\circ\text{C}$ . При наличии в системе значительно большей концентрации водной компоненты  $\varphi_3 = 32.4\%$  максимум термоактивационного тока соответствует температуре  $T_3 = 130^\circ\text{C}$ .

Особый интерес представляют спектры ТСТ при больших величинах адсорбции водной компоненты (рис. 2). В этом случае особенностью динамики является наличие разнополярных пиков. Амплитуда пика термотока соответствует значению  $15 \cdot 10^{-6}$  А при температуре 32°C и почти на порядок превышает амплитуду аналогичных максимумов с меньшей величиной адсорбции водной фазы. Этот результат можно объяснить интенсивным межфазным взаимодействием и накоплением свободных



**Рис. 2.** Спектры ТСТ мелкоразмерного флогопита дисперсностью 20–32 μm для адсорбции 100%.

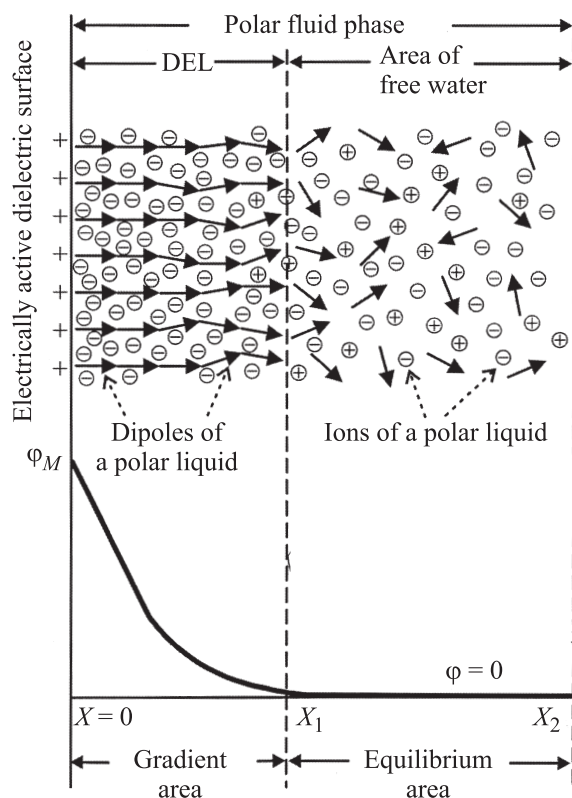
электрических зарядов в электроконтактной области разнородных материалов и в объеме системы. Смена направления тока свидетельствует об изменении направления напряженности собственного электрического поля в системе. Поскольку источниками напряженности поля двухфазной системы являются: а) заряды, расположенные на активной твердой поверхности мелкоразмерных частиц слюды; б) полярные молекулы и ионы водной компоненты, при увеличении концентрации водной компоненты до 100% вклад ионов и полярных молекул увеличивается. При этом напряженность твердой фазы остается неизменной. Таким образом, происходит увеличение вклада напряженности внутреннего поля, создаваемого ионами и молекулами полярной жидкой фазы. Отсюда следует вывод о возможности изменения не только модуля, но и направления внутреннего электрического поля. Отрицательный максимум характеризуется значительно возросшей амплитудой тока ( $2 \cdot 10^{-5}$  А), при этом энергия активации равна  $U = 0.46$  eV.

Анализ экспериментальных результатов и численные расчеты позволяет установить, что в электрически активных дисперсных системах к особым свойствам можно отнести наличие соединений, способных осуществлять эффективные электрические контакты между поверхностно-активными твердыми и полярными жидкими разнородными материалами. Результатом являются генерации электрической энергии и появление градиента потенциала устойчивого внутреннего поля, что придает системе свойства электрического аккумулятора.

#### 4. Модель процессов

На основе полученных данных построена модель процессов, протекающих в электрически активных дисперсных системах (рис. 3). основополагающим фактором в понимании механизма электрофизических процессов на межфазных границах является электрическое взаимодействие между полярными молекулами жидкой фазы

и зарядами на поверхности твердой диэлектрической компоненты. Контактная область между двумя электрически активными разнородными фазами образует двойной электрический слой (ДЭС). Особенностью такого слоя является то, что он принадлежит как твердой, так и жидкой компоненте системы и формируется под действием ее собственного внутреннего поля. Под действием внутреннего электрического поля молекулы полярной воды способны не только диссоциировать на свободные ионы, но и поляризоваться. Поскольку вблизи активной поверхности твердой фазы напряженность внутреннего поля максимальна, электрическое взаимодействие ионов с заряженными дефектами твердой фазы преобладает над их тепловым движением. Поэтому ионы жидкости, адсорбированные твердой поверхностью и непосредственно контактирующие с ней, образуют слой, в котором находятся как строго упорядоченные молекулы полярной воды, так и свободные — слой Гельмгольца [17], характеризующийся наибольшей плотностью заряда. Действие собственного электрического поля в этом слое является максимальным и превалирует над тепловым разупорядочением. Активная поверхность твердой фазы, где напряженность внутреннего поля максимальна, является первой границей двойного электрического слоя (рис. 3). По мере удаления от слоя Гельмгольца электрическое поле заряженных дефектов



**Рис. 3.** Схематическое представление мезоскопической структуры полярной жидкой пленки. DEL — двойной электрический слой.

твердой фазы экранируется свободными ионами жидкой среды, которые распределены по всему объему ДЭС. В результате экранирования зарядов твердой поверхности потенциал собственного внутреннего электрического поля понижается и тепловое движение начинает преобладать над электрическим взаимодействием ионов с внутренним полем. Этот процесс способствует формированию слоя ионов с диффузной структурой распределения зарядов. Этот слой в отличие от слоя Гельмгольца характеризуется интенсивной термополевой ионизацией полярных молекул жидкости. В связи с тем, что противоионы жидкой компоненты находятся под действием не только внутреннего поля, но и теплового движения, наблюдается их распределение в зоне контакта разнородных компонент.

Поскольку суммарный заряд ионов жидкой фазы равен суммарному заряду твердой поверхности, потенциал внутреннего электрического поля, вне объема ДЭС, стремится к нулю. Это приводит к тому, что начиная с некоторого расстояния от поверхности твердой компоненты, напряженность внутреннего электрического поля становится равной нулю, а ионы жидкости в этой области находятся под воздействием только теплового движения. В этой области градиенты концентрации ионов и суммарная плотность объемного заряда также равны нулю. На этом расстоянии от электрически заряженной поверхности твердой компоненты проходит вторая граница ДЭС. Она находится в жидкой фазе и разделяет диффузный слой ионов и слой свободных ионов. За этой границей, вне объема ДЭС, потенциал внутреннего поля равен нулю и ионы находятся под действием только теплового движения.

Таким образом, потенциал и напряженность внутреннего электрического поля уменьшаются от максимального значения на твердой поверхности ДЭС на первой границе, до нуля на второй границе ДЭС. Следовательно, вся внутренняя разность потенциалов и термостимулированные токи реализуются только в объеме ДЭС, где воздействие градиентов потенциала свободно внутреннего электрического поля на свободные ионы преобладает над их тепловым движением.

## 5. Заключение

Обнаружены особые свойства электрически активных гетерогенных мелкодисперсных систем на основе слоистых алюмосиликатов. На границах раздела активной поверхности твердой низкоразмерной диэлектрической частицы и полярной жидкой фазы зарегистрировано появление градиентов потенциала устойчивого внутреннего поля. Собственное поле является катализатором процессов диссоциации в полярной матрице, что приводит к повышению в ней концентрации свободных ионов. В результате электрического взаимодействия ионов жидкости с заряженной поверхностью твердой фазы вблизи последней происходит эффективное накопление

(электрическая адсорбция) противоионов, что является свидетельством проявления электретоного эффекта. Кулоновское взаимодействие упорядоченно и близко расположенных, пространственно разделенных разноименных зарядов, находящихся на межфазных границах электрически активных твердых и жидких компонент, формирует двойной электрический слой. ДЭС является новой фазой структурообразования, характерной только для электрически активных систем. Принципиальной особенностью таких ДЭС является то, что они образуются под действием внутреннего собственного поля системы. Механизм формирования ДЭС включает электроконтактное взаимодействие поверхностей двух разнородных жидких и твердых полярных диэлектриков.

## Список литературы

- [1] В.А. Карнаков, Я.В. Ежова, С.Д. Марчук, В.И. Донской, Л.А. Щербаченко. ФТТ **48**, 1946 (2006).
- [2] В.С. Борисов, В.А. Карнаков, Я.В. Ежова, О.Б. Рубцова, Л.А. Щербаченко. ФТТ **50**, 980 (2008).
- [3] В.С. Борисов, Л.А. Щербаченко. ФТТ **51**, 2394 (2009).
- [4] С.В. Авдейчик, В.А. Лиопо, В.А. Струк. Докл. НАН Беларуси **48**, 113 (2004).
- [5] В.И. Веттегрень, А.Я. Башкарев, М.А. Суслов. ЖТФ **77**, 6, 135 (2007).
- [6] Л.А. Щербаченко, В.С. Борисов, Н.Т. Максимова, Е.С. Барышников, В.А. Карнаков, С.Д. Марчук, Я.В. Ежова, Л.И. Ружников. ЖТФ **79**, 9, 129 (2009).
- [7] Л.А. Щербаченко, В.С. Борисов, Н.Т. Максимова, Е.С. Барышников, Я.В. Ежова, В.А. Карнаков, С.Д. Марчук, Ю.Т. Эйне. ЖТФ **80**, 8, 136 (2010).
- [8] Б.В. Дерягин, Н.В. Чураев, В.М. Муллер. Поверхностные силы. Наука, М. (1985). 339 с.
- [9] М.С. Мецик, Л.А. Щербаченко. Электрические свойства слюды. ИГУ, Иркутск (1990). 328 с.
- [10] Н.В. Чураев. Исследование свойств тонких слоев жидкостей. МГУ, М. (1974). 84 с.
- [11] Б.В. Дерягин, З.М. Зорин, В.Д. Соболев, Н.В. Чураев. Свойства тонких слоев воды вблизи твердых поверхностей — связанная вода в дисперсных системах. ИГУ, Иркутск (1980). 413 с.
- [12] Л.С. Пинчук, А.Г. Кравцов, С.В. Зотов. ЖТФ **71**, 5, 115 (2001).
- [13] Л.А. Щербаченко, В.С. Борисов, В.А. Карнаков, Н.Т. Максимова, С.Д. Марчук, Е.С. Барышников, А.Р. Харлан. Изв. вузов. Физика **52**, 343 (2009).
- [14] J.I. Frenkel, J. Exper. J. Theor. Phys. **8**, 1292 (1938).
- [15] У.Б. Базарон, Б.В. Дерягин, А.В. Булгазаев. ДАН СССР **166**, 639 (1966).
- [16] Ю.А. Гороховатский, Г.А. Бордовский. Термоактивационная токовая спектроскопия высокоомных полупроводников и диэлектриков. Наука, М. (1991). 248 с.
- [17] П. Делаксей. Двойной слой и кинетика электродных процессов. Мир, М. (1967). 551 с.