

ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ НА МЕЖФАЗНЫХ ГРАНИЦАХ

УДК 544.42+544.723

АНАЛИЗ МЕТОДОВ ПОВЫШЕНИЯ АДсорбЦИОННОЙ СПОСОБНОСТИ ТАЛЬКА

© 2019 г. А. А. Яковлева*

Иркутский научно-исследовательский технический университет, Иркутск, Россия

**e-mail: ayakovistu@mail.ru*

Поступила в редакцию 31.10.2017 г.

После доработки 03.02.2018 г.

Принята к публикации 14.03.2018 г.

Минеральные адсорбенты, такие как тальк, являются распространенными в природе материалами, которые используются в качестве поглотителей, вяжущих, наполнителей и т.п. Предварительная обработка (механическая или физико-химическая) открывает новые возможности производства высокоэффективных минеральных материалов с широким спектром назначения. Продемонстрированы возможности использования различных приемов для усиления поглотительных свойств дисперсного талька – обогащение и использование в смеси с другим минералом, обработка различными реагентами, изменение температуры и кислотности среды. Рассмотрены происходящие при этом явления и закономерности, влияющие на адсорбционную способность талька. Модификация поверхности талька позволяет существенно повышать его технологические возможности поглощать смолистые фракции древесной массы при производстве бумаги. Показано, что адсорбционно-структурные характеристики дисперсного талька существенно изменяются при проведении модифицирования органическими реагентами. Наибольший эффект достигается при предварительной обработке талька катионоактивным ПАВ – N-цетилпиридиний хлорида. Такой адсорбент характеризуется высоким показателем поглощения канифоли, доходящим до 200 мг/г, соизмеримым с данными по поглощению канифоли тальком, обработанным промышленной смесью “Пента-416”. При использовании доступных, недорогих и безопасных анионоактивных ПАВ за счет повышения температуры, изменения кислотности среды, смещения гидрофильно-гидрофобного баланса происходят существенные изменения свойств поверхности. Наиболее высокая величина адсорбции канифоли (160–170 мг/г) характерна для образцов талька, модифицированного олеатом натрия и обогащенного оксидом цинка. Показана значимость обработки талька растворами минеральных кислот и солей, способствующей расслаиванию суспензии и формированию компактного осадка.

Ключевые слова: минеральные адсорбенты, тальк, оксид цинка, канифоль, смола, адсорбция, модифицирование, поверхностно-активные вещества

DOI: 10.1134/S0044185619030288

ВВЕДЕНИЕ

Диапазон использования талька очень широк, в него входят и некоторые стадии изготовления бумаги, где минерал служит поглотителем смол и жиров, содержащиеся в волокнистых материалах, полученных из древесины. Смолистые вещества обладают высокой адгезионной способностью и не удаляются на стадиях подготовки бумажной массы, вызывая затруднения в работе технологического оборудования [1–4]. Тонкоизмельченный тальк обеспечивает очистку и служит наполнителем бумажной массы для придания ей белизны [5]. Модифицирование поверхности позволяет существенно повышать технологические возможности талька поглощать смолистые вещества [6, 7]. В результате модифицирования на поверхности твердых тел обычно формируется тонкий слой

модификатора, который может выступать эффективным регулятором многих важных свойств [8].

Вместе с тем, до настоящего времени не решен до конца вопрос о подборе качественных и дешевых реагентов для повышения поглотительной способности минеральных адсорбентов. Имеющиеся публикации показывают, что ведутся активные исследования адсорбционных свойств талька и их зависимости от различных факторов, анализ большей части из них приведен в [9]. Такие проекты, как правило, направлены на практические цели и определение оптимальных условий подготовки талька. Вместе с тем, тальк – идеальная модель для изучения механизма адсорбции на неоднородных поверхностях, поэтому неудивительно, что многие из них носят в тоже время глубокий научный характер.

Минерал тальк – гидратированный силикат магния. Элементарную кристаллическую решетку минерала образует слой гидроксида магния, обрамленный двумя одинаковыми слоями неполярных кремнекислородных тетраэдров, которые составляют ряд гексагональных циклов, связанных друг с другом [10]. Атомы кислорода в основаниях тетраэдров триоктаэдрического талька расположены приблизительно в одной плоскости. Длина связи тетраэдрический катион–кислород зависит от многих факторов (сорта катиона, степени и характера изоморфных замещений, состава межслоевых катионов и др.) и при определенных условиях может изменяться. Благодаря своей кристаллической структуре тальк обладает идеальной спайностью, легко расщепляется на тончайшие гибкие лепестки, которые имеют 2 типа поверхности: базальная поверхность возникает в результате межслоевого скольжения, боковая – в результате разрушения ионных связей. Базальные поверхности образуются в основном из компенсационных атомов кислорода в группах силоксана ($-\text{Si}-\text{O}-\text{Si}-$) и обладают низкой энергией и гидрофобным поведением. Боковые поверхности состоят из гидроксированных связей $\text{O}-\text{H}$, соединенных с остовом через связи $-\text{Mg}-\text{O}-$, ионов кремния, кислорода и магния. Они обладают относительно высоким электрическим зарядом и гидрофильным поведением [11].

Для решения задач повышения поглотительной способности талька нами проведен комплекс исследований и рассмотрены некоторые эффекты, сопровождающие обработку адсорбента.

Цель статьи – обобщение результатов коллоидно-химических исследований адсорбционной способности талька Онотского месторождения (Иркутской область).

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Краткая характеристика объекта исследования

По данным рентгенодифракционного фазового анализа тальк Онотского месторождения (тальк ОМ) представлен минералом совершенной стехиометрии $\text{Mg}_3\text{Si}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2$ с содержанием хлорита $(\text{Mg}, \text{Fe})_3[(\text{Al}, \text{Si})_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2] \cdot 3(\text{Mg}, \text{Fe})(\text{OH})_2$ в количестве 2.69% по массе. В целом, тальк ОМ характеризуется высокой минералогической однородностью и химической чистотой.

При проведении исследований использовали образцы талька ОМ с удельной поверхностью $11.1 \text{ м}^2/\text{г}$ и средним размером частиц (по максимуму на кривой распределения) 6 мкм.

Для характеристики адсорбционных свойств талька большое значение имеет соотношение гидрофильной (боковой) и гидрофобной (базальной) поверхностей, которое отражает вклад замещающих ионов в решетке минерала. Принято

считать, что площадь боковых поверхностей тальков различных месторождений составляет не более 25% общей [12, 13]. Для талька ОМ соотношение определено равным 12 и 88% [14]. Полученное соотношение является уникальным по сравнению с другими тальками и вносит существенный вклад в своеобразие механизма поверхностных процессов.

Одним из методов повышения поглотительной емкости минеральных порошков является обогащение и использование комбинированных смесей [1]. В исследованиях поглотительной способности талька при обогащении его оксидом цинка использовали препарат квалификации “х. ч.”.

Оксид цинка (цинкит) – минерал, который хорошо зарекомендовал себя во многих, схожих с тальком областях, в т.ч. как наполнитель и пассиватор смолистых составляющих в бумажной массе [3]. В сравнении с кристаллической решеткой талька слоистость в решетке оксида цинка отсутствует. Как минеральный, так и синтетический цинкит кристаллизуется в гексагональной кристаллической решетке. В каркасе элементарной ячейки упорядочено расположены атомы кислорода и цинка в центре и углах пирамид, причем атомы кислорода оказываются в центре пирамиды с атомами цинка по углам и наоборот [15]. Цинкит, имея гидрофильную поверхность, в смеси с тальком может изменять гидрофильно-гидрофобное соотношение последнего, повышать его органophilность и усиливать поглотительные свойства.

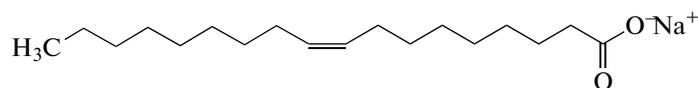
Комбинированные образцы были получены механическим перемешиванием навесок порошков, в созданных образцах итоговая удельная поверхность повышалась незначительно: до $11.2 \text{ м}^2/\text{г}$ в смеси с 10% и до $11.18 \text{ м}^2/\text{г}$ в смеси с 20% по массе ZnO .

Перед опытами по адсорбции исследуемые порошки (тальк и цинкит) выдерживали в сушильном шкафу при температуре 105°C в течение четырех часов, чтобы испарилась вода, адсорбирующаяся из воздуха.

Растворы электролитов готовили из 0.1 М стандарт-титров обычными аналитическими приемами накануне проведения экспериментов.

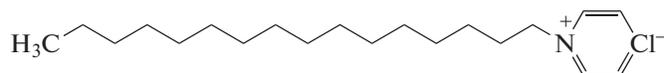
Для модифицирования использовали различные поверхностно-активные вещества (ПАВ), причем каждый из используемых ПАВ вносил собственный вклад в общую картину исследований. Например, олеат натрия интересен тем, что моделирует анионные частицы смолы и липких веществ.

Олеат натрия $\text{C}_{17}\text{H}_{33}\text{COONa}$ является солью ненасыщенной олеиновой-цис-9-октадеценовой кислоты. В растворе он диссоциирует на анионный поверхностно-активный радикал и катион натрия:



Исходные растворы готовила из навесок, растворы вдвое меньших концентраций получали последовательным разбавлением. Как правило, использовали восемь растворов с концентрацией от 0.08 до $6.25 \cdot 10^{-4}$ М.

N-цетилпиридиний хлорида $C_{21}H_{38}NCl$ в воде диссоциирует на катионный поверхностно-активный радикал и хлор-ион:



Исходный раствор N-цетилпиридиний хлорида готовили из стандарт-титров по классической методике и разбавлением готовили растворы разных концентраций вплоть до 7.81×10^{-5} М.

Использовали реактивы марок “ч.”, “ос. ч.” или “ч. д. а.”. При необходимости (для реактивов марки “ч.”) проводили качественный и количественный анализ присутствия примесей. Например, обнаруженное повышенное содержание олеиновой кислоты в олеате натрия позволило уточнить величину экспериментальной критической концентрации мицеллообразования и объяснить механизм процесса [16].

В качестве контрольного использовали препарат “Пента-416” – смесь неионогенных, ионогенных ПАВ и полиокси(диметилсилилен)а с группировкой $[-(CH_3)_2SiO-]_n$. Готовили исходный 50% раствор (50 объемных частей жидкой смеси – 50 объемных частей воды). Растворы с концентрациями вдвое меньше вплоть до 0.2% получали последовательным разбавлением.

Известно, что смоляные вещества вырабатываются всеми хвойными деревьями и являются природными карбоновыми кислотами [4]. Для исследования их можно получать как прямым экстрагированием смолы из бумажной массы, так и использовать имитирующие системы. Для экспериментов была использована канифоль – одна из самых известных смол, которая содержит до 60–92% смоляных кислот [1]. Водный золь живичной канифоли готовили методом замены растворителя [17]. Из исходного золя канифоли готовили рабочие растворы необходимых концентраций.

Суспензии в разных сериях имели различную концентрацию, использовали 0.1; 1 или 10% (по массе) системы. Адсорбцию проводили во встряхивателе “Water bath shaker Elpan–357” (амплитуда – 5, скорость – 100–150 об./мин) до равновесия, при котором достигается предел адсорбции [18]. После полного осаждения твердых фракций надосадочную жидкость отбирали для определения поверхностного натяжения.

Изучение изотермы адсорбции является одним из наиболее предпочтительных подходов к

исследованию механизма поверхностного процесса. Именно изотермы адсорбции позволяют достаточно полно сформировать представления о физико-химических закономерностях поверхностного процесса. Для определения величины адсорбции на поверхности талька использовали метод Ребиндера и измеряли величины поверхностного натяжения исходного раствора и раствора после адсорбции. Изотерма поверхностного натяжения исходного раствора выполняла функцию калибровочной кривой для определения равновесной концентрации раствора после установления адсорбционного равновесия [8, 9, 17].

Величину адсорбции вычисляли по разности исходной и равновесной концентраций рабочего раствора при известных величинах навески талька и объема раствора, из которого идет адсорбция.

В опытах с золем канифоли определение величины адсорбции было основано на измерениях оптической плотности системы до и после адсорбции на фотоколориметре КФК-3. Учитывая склонность золя к коагуляции, калибровочные кривые строили индивидуально и непосредственно накануне эксперимента [19].

Для подтверждения достоверности получаемых результатов при проведении адсорбционных исследований в некоторых сериях проводили параллельные опыты [9].

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Катионогенные ПАВ используют все особенности строения частицы талька: гидрофобными радикалами они прикрепляются к базальным поверхностям силами Ван-дер-Ваальса, а за счет электростатических сил положительно-заряженной группировкой удерживаются на отрицательно-заряженных боковых гранях частиц. Значение предельной адсорбции N-цетилпиридиний хлорида на тальке в условиях опытов составляло $(4.00 \pm 0.22) \times 10^{-5}$ моль/г [20].

Все образцы, предварительно обработанные N-цетилпиридиний хлоридом, проявляли высокую адсорбционную способность к канифоли,

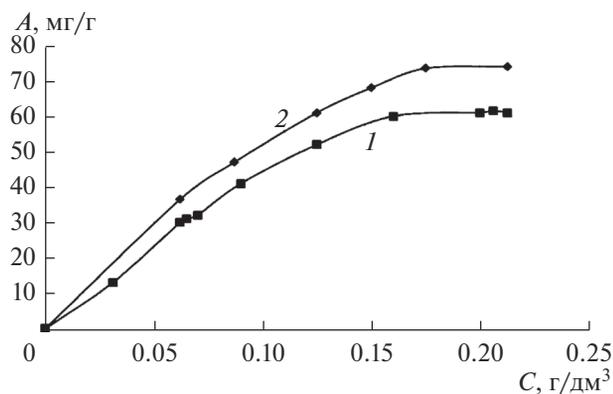


Рис. 1. Адсорбция канифоли: 1 – исходный тальк; 2 – тальк, модифицированный олеатом натрия.

доходящую до 200 мг/г и более [19]. Сильно мутные золи канифоли после адсорбции на тальке, модифицированном N-цетилпиридиний хлоридом, становились прозрачными, их оптическая плотность в некоторых случаях снижалась практически до оптической плотности воды.

В контрольной серии экспериментов со смесью “Пента-416” было определено, что максимальную поглотительную способность талька к канифоли обеспечивает уже 32-х кратное разведение исходной смеси. Полученные результаты по адсорбции канифоли оказались практически равными результатам, полученным для катионоактивного ПАВ. Таким образом, поглотительная способность талька, модифицированного N-цетилпиридиний хлоридом, не уступает способности талька, модифицированного промышленной смесью сложного состава, однако использование данного препарата может привести к значительному удорожанию технологического процесса.

Уже небольшие концентрации раствора олеата натрия обеспечивают образование сплошной адсорбционной пленки. Этого оказывается достаточно для того, чтобы адсорбция канифоли на модифицированной поверхности оказалась выраженной оптимально (рис. 1).

Изучение адсорбции канифоли показало, что предварительная обработка анионными веществами способствует незначительному повышению поглотительной способности.

Адсорбцию канифоли на поверхности образцов демонстрируют ИК-спектры (рис. 2).

У образца исходного талька отсутствуют полосы 2926 и 2854 см⁻¹, которые отражают асимметричные колебания C–H связей органических веществ, составляющих канифоль [20].

Несмотря на невысокие показатели поглощения использование анионоактивных ПАВ для модифицирования имеет свою привлекательность.

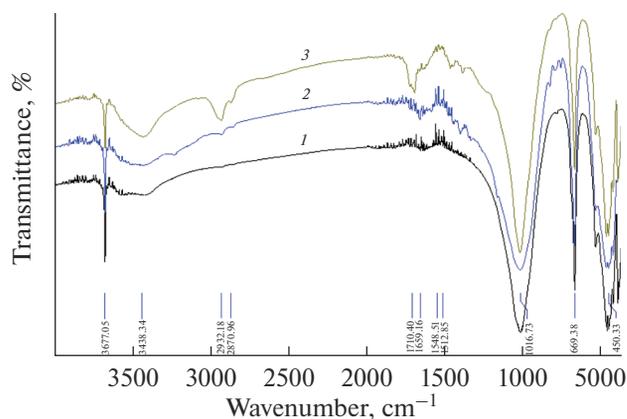


Рис. 2. ИК-спектры образцов талька: 1 – исходный тальк; 2 – тальк, модифицированный олеатом натрия; 3 – тальк, модифицированный N-цетилпиридиний хлоридом.

Производимые анионоактивные ПАВ имеют широкий спектр, доступны и недороги, безопасны как биологически растворимые. В сериях опытов с анионогенными ПАВ было установлено, что адсорбция идет по мономолекулярному механизму и не зависит от мицеллообразования в растворе, “рабочими” поверхностями служат только базальные грани пластинчатых микрочастиц талька ОМ [21]. Анализ результатов позволяет предполагать, что при увеличении концентрации олеата натрия в растворе адсорбированные радикалы постепенно поднимаются до вертикального положения с минимальной площадью касания с поверхностью талька, располагаются друг с другом в тесном соприкосновении и образуют т.н. “часток Ленгмюра”. Подобное явление имеет место достаточно часто, например, оно характерно для адсорбции додецилсульфата натрия на оксиде алюминия [22]. Оно может рассматриваться как начальный этап подготовки или свидетельствовать о потенциальных возможностях поверхности и ее склонности к изменению механизма адсорбции, обеспеченной особой, благоприятной локализацией атомов кристаллической решетки.

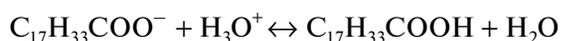
Значимость использования олеата натрия может быть существенно повышена при нагревании и изменении кислотности среды. Адсорбция анионогенного ПАВ на тальке зависит от температуры и существенно увеличивается с нагреванием раствора [18, 23]. Очевидно, это связано с изменением механизма адсорбции и свидетельствует о процессах некоторой самоорганизации в поверхностном слое [6]. Проведенные расчеты показывают, что большее значение при этом приобретает энтропийный фактор, включающий разрушение структуры воды вокруг молекул ПАВ и поверхности талька и упорядоченное группирование углеводородных радикалов ПАВ. Сложный

характер изотерм, по всей видимости, связан с подвижностью свободных радикалов олеата натрия и их способностью к агрегированию, переплетению, сворачиванию в клубки, образованию сферических или цепочечных агрегатов, тем более, что концентрационная область растворов соответствует мицеллярной. Поэтому увеличение величины адсорбции, на наш взгляд, может быть связано исключительно с процессами агрегирования у поверхности частиц талька – мицеллообразованием и т.п. Подобными эффектами объясняют свои результаты многие авторы [6, 24].

Роль особенностей поверхности талька также существенна. Геометрические параметры твердых тел меняются при нагревании, что приводит к деформации частиц [25]. Под влиянием температуры возможно расширение расстояния между слоями талька по краям частиц и образование пор, которые доступны для молекул олеата натрия. Кроме того, тальк может просто разрушаться по базальным поверхностям, связанным друг с другом слабой дисперсионной силой, в результате чего гидрофобность новых полученных частиц повышается.

Для оценки влияния pH проведены серии опытов, в которых показано, что кислотность среды, в которой протекает адсорбция олеата натрия на тальке, влияет на механизм процесса [21, 26]. В нейтральной среде адсорбция идет по мономолекулярному механизму и завершается насыщением поверхности. В щелочной среде (pH 9) изотерма адсорбции имеет L-тип (по классификации Гильса), но предельное значение адсорбции возрастает практически вдвое. Возрастание может быть связано в том числе с гидролизом боковой поверхности талька, в результате чего образуются ионы $Mg(OH)^+$, которые активизируют процесс за счет электростатической силы.

В кислой среде (pH 5) среде анионы олеата натрия способны соединяться с ионами водорода с образованием олеиновой кислоты:



и в растворе возможно существование везикул – агрегатов, состоящих из молекул олеиновой кислоты и анионов олеата [27]. Адсорбция происходит за счет присоединения мицелл и везикул к поверхности талька, очевидно, через водородную связь между карбонильными группами молекул олеиновой кислоты, находящихся в везикулах, и поверхностью талька (рис. 3).

В зависимости от своей пространственной ориентации мицеллы и везикулы способны избирательно адсорбироваться на частицах талька, завершая формирования новой макрочастицы, ядром которой является частица талька, окутанная оболочкой, состоящей из полислоев мицелл и везикул. Агрегаты внешних слоев, оказавшиеся на

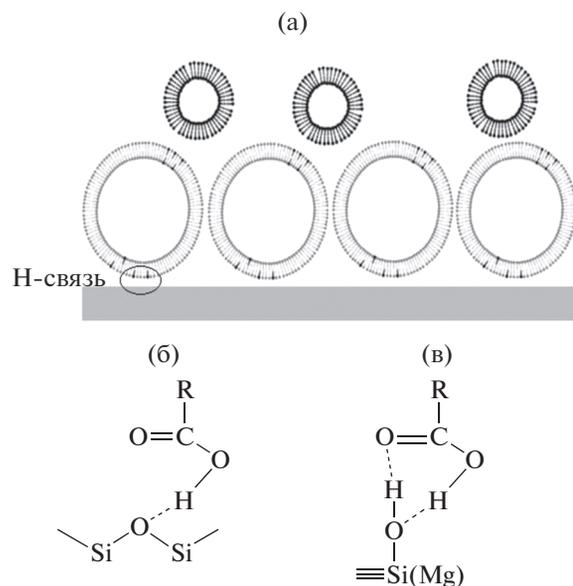


Рис. 3. Схема адсорбции везикул на поверхности талька (а) и образование водородной связи молекулами олеиновой кислоты с базальной (б) и боковой (в) поверхностями талька.

границе со средой, способны диффузно обмениваться с мицеллами и везикулами из раствора, поэтому механизм адсорбции можно условно считать диффузионно-везикулярным [26]. Таким образом, проводя модифицирование талька олеатом натрия при повышенных температурах или изменяя кислотность среды, можно воздействовать на механизм адсорбции и обеспечить формирование механически прочной пленки ПАВ на поверхности. Было установлено, что такие образцы дают хорошие результаты по величинам предельной адсорбции канифоли. На тех образцах, которые прошли модифицирование в горячих растворах олеата натрия, произошло увеличение адсорбции канифоли, причем самой высокой, практически в два раза большей, оказалась адсорбция в образцах из растворов при 45°C. Очевидно, при большей температуре все-таки сказывается влияние конвекции и трения. Образцы талька, прошедшие модифицирование олеатом натрия в щелочной и кислой среде, также приобретают свойства, позволяющие им более эффективно адсорбировать канифоль: для кислой среды увеличение адсорбции канифоли достигает 160–170 мг/г; для щелочной – до 130–135 мг/г.

При кислотной активации использовали перемешивание 10% (по массе) суспензий порошков в растворах 0.1 М соляной кислоты. Обнаруженный при этом эффект повышения смачиваемости талька связан с влиянием H^+ -ионов, которые проникают в поверхностные микротрещины и диспергируют частицы, обновляя и увеличивая ад-

сорбционную поверхность [28]. Тальк в H^+ -форме быстро осаждается, дает плотный осадок и прозрачную надосадочную жидкость, в то время как исходный тальк адсорбирует канифоль с образованием рыхлого осадка и длительное время неосветляющейся надосадочной жидкости. Этот эффект является важным технологическим достоинством, однако величина адсорбции канифоли на тальке в H^+ -форме лишь незначительно больше той, которая характеризует использование обыкновенного талька, и доходит до 82–83 мг/г. Схожий эффект имеет обработка талька электролитами – растворами сернокислых солей натрия, магния и алюминия [29]. При седиментации талька из растворов электролитов надосадочная жидкость достаточно быстро становится прозрачной, осадки образуются плотные и компактные, на их формирование уходит гораздо меньшее время. Увеличение концентрации любого из электролитов приводит к росту массы осадка талька, однако присутствие ионов магния в дисперсионной среде наиболее благоприятствует седиментации, что, очевидно, связано со сродством магния к тальку.

Данные по модифицированию комбинированной смеси олеатом натрия свидетельствуют, что адсорбция сопровождается образованием монослоя из молекул ПАВ. Полученные в этих сериях опытов изотермы адсорбции относятся к простейшим ленгмюровским и имеют схожий вид. Предельное значение адсорбции составляет 8.2×10^{-5} моль/г, что превышает значение на чистом тальке. Это говорит о значительном влиянии оксида цинка на изменение поверхностных свойств смеси [30–32].

Оксид цинка влияет и на поглощение тальком канифоли, причем более значительным это влияние оказывается в образцах, содержащих 10 мас. % ZnO. Очевидно, причина заключается в определяющей роли физико-химии поверхности и специфическом взаимодействии компонентов на поверхности модифицированных минеральных образцов. На поверхности образцов, предварительно обработанных анионоактивным ПАВ, существует конкурентная адсорбция. Ее успех определяют, с одной стороны, геометрические особенности адсорбирующихся фрагментов – их длина, характер углеводородного радикала и др., с другой – условия, созданные на подложке, вид и конфигурация активных центров, другие поверхностные свойства кристаллов, которые зависят от направления раскалывания [9]. При дроблении частицы талька разрушаются преимущественно вдоль базальной поверхности. У оксида цинка места разломов решетки располагаются по плоскостям – граням тетраэдров, т.е. практически вся поверхность дисперсного минерала активна. Поэтому в комбинированной смеси оксид цинка, обладая гидрофильной поверхностью,

способен менять характер гидрофобных взаимодействий.

Присутствие оксида цинка приводит к возрастающей роли контактного эффекта в местах соприкосновения и созданию внутренних поверхностей, механизм адсорбции на которых иной [33, 34]. Следствием становится более сильная адсорбция внутри пор по сравнению с адсорбцией на внешней поверхности.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Представленный анализ выполнен по результатам исследований поглотительных свойств талька в системе, содержащей микрочастицы живой канифоли, имитирующей смесь смолистых компонентов древесины. Обобщение результатов свидетельствует, что для повышения адсорбционной способности талька Оротского месторождения перспективными оказываются методы, направленные на изменение структуры поверхности минерала. Среди таких методов рассмотрены химическая активация поверхности минерала при обработке различными реагентами, смешивание с другим минералом для изменения гидрофильно-гидрофобного баланса, изменение температуры и кислотности среды. Наиболее значимыми оказались результаты с использованием катионоактивного N-цетилпиридиний хлорида, однако с позиций доступности и безопасности обнадуживающими и привлекательными следует считать результаты с образцами талька, обогащенного оксидом цинка и модифицированного анионоактивным олеатом натрия. Полученные результаты необходимы (могут быть востребованы) при разработке рекомендаций для целенаправленного воздействия на поглотительные свойства талька ОМ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Новый справочник химика и технолога. Сырье и продукты промышленности органических и неорганических веществ. Ч. 1. С-Пб.: Профессионал, 2010. 988 с.
2. Лапин В.В. // Целлюлоза. Бумага. Картон. 2006. № 4. С. 56–58.
3. Пузырев С.С., Тюрин Е.Т., Ковалева О.П. // Целлюлоза. Бумага. Картон. 2006. № 9. С. 66–70.
4. Азаров В.И., Буров А.В., Оболенская А.В. Химия древесины и синтетических полимеров. М.: Изд-во Лань, 2010. 624 с.
5. Назаренко В.В. // Целлюлоза. Бумага. Картон. 2010. № 3. С. 36.
6. Адсорбция из растворов на поверхностях твердых тел / Под ред. Парфит Г., Рочестер К. М.: Мир, 1986. 488 с.
7. Стрельникова О.Ю., Бельчинская Л.И., Петухова Г.А. Влияние реагентной обработки на состояние поверхности минеральных сорбентов // Актуальные

- проблемы теории адсорбции, пористости и адсорбционной селективности. М., 2010. С. 110.
8. Шукин Е.Д., Перцов А.В., Амелина Е.А. Коллоидная химия. М.: Изд-во Высш. шк., 2006. 444 с.
 9. Чьонг С.Н. Изучение физико-химических закономерностей адсорбции в суспензиях талька Онотского месторождения: дис. ... канд. хим. наук. Иркутск: ИрГТУ, 2012. 176 с.
 10. Тарасевич Ю.И. Строение и химия поверхности слоистых силикатов. Киев: Изд-во Наукова думка, 1988. 248 с.
 11. Ferrage E., Martin F., Boudet A. et al. // J. Materials Science. 2002. V. 37. P. 1561–1573.
 12. Jenkins P., Ralston J. // Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects. 1998. V. 139. P. 27–40.
 13. Яковлева А.А. Оценка гидрофильно-гидрофобного соотношения талька Онотского месторождения // Современные проблемы адсорбции. М.: Изд. группа “Граница”, 2013. С. 125.
 14. Шуман В. Мир камня. Горные породы и минералы. М.: Мир, 1986. С. 168.
 15. Яковлева А.А., Чьонг С.Н., Придатченко Ю. и др. // Известия вузов. Прикладная химия и биотехнология. 2013. № 1. С. 105–111.
 16. Яковлева А.А. Коллоидная химия. Иркутск: Изд-во ИрГТУ, 2013. 208 с.
 17. Яковлева А.А., Чьонг С.Н., Ле М.Л. // Известия вузов. Химия и химическая технология. 2015. № 2. С. 22–26.
 18. Яковлева А.А., Чьонг С.Н. // Известия вузов. Прикладная химия и биотехнология. 2011. № 1. С. 72–77.
 19. Яковлева А.А., Чьонг С.Н. // Вестник ИрГТУ. 2010. № 5. С. 224–229.
 20. Яковлева А.А. // Известия вузов. Прикладная химия и биотехнология. 2014. № 5. С. 7–14.
 21. Zhang R., Somasundaran P. // Advances in Colloid and Interface Science. 2006. V. 123–126. P. 213–229.
 22. Яковлева А.А., Чьонг С.Н., Ле М.Л. // Вестник ИрГТУ. 2011. Т. 48. № 1. С. 143–147.
 23. Русанов А.И., Шекин А.К. Мицеллообразование в растворах поверхностно-активных веществ. СПб.: Химия, 2016. 612 с.
 24. Фомкин А.А. Адсорбционная деформация микропористых адсорбентов // Актуальные проблемы теории адсорбции, пористости и адсорбционной селективности. М., 2010. С. 23.
 25. Яковлева А.А., Чьонг С.Н. // Известия вузов. Химия и химическая технология. 2012. Т. 55. Вып. 4. С. 47–51.
 26. Takatori M., Yasuyuki K., Hiroshi O. // Tappi J. 2000. V. 83. № 7. P. 1–7.
 27. Яковлева А.А., Рыбина М.Н. Кислотно-гидроксидная обработка талька в чистом виде и в виде смеси с оксидом цинка // Актуальные проблемы химии и биотехнологии. Иркутск: Изд-во ИрГТУ, 2015. С. 31–33.
 28. Яковлева А.А., Бочарова М.А. // Вестник ИрГТУ. 2009. № 1. С. 181–186.
 29. Яковлева А.А., Мальцева Г.Д. // Известия вузов. Прикладная химия и биотехнология. 2015. № 2. С. 16–23.
 30. Яковлева А.А. Адсорбция олеата натрия на тальке, обогащенном оксидом цинка // Актуальные проблемы теории адсорбции, пористости и адсорбционной селективности. М.: Изд. группа “Граница”, 2014. С. 125.
 31. Яковлева А.А., Рыбина М.Н. Влияние оксида цинка на адсорбционные свойства талька // Актуальные проблемы теории адсорбции, пористости и адсорбционной селективности. М.: Изд. группа “Граница”, 2015. С. 118.
 32. Ferrage E., Seine G., Gaillot A.C. et al. // Eur. J. Mineral. 2006. V. 18. P. 483–491.
 33. Фомкин А.А. Адсорбция в микропорах. Нанодиспергированное состояние вещества // Актуальные проблемы теории адсорбции, пористости и адсорбционной селективности. М., 2015. С. 7.