

**Ф. А. Быков, А. С. Одинцов, Е. Л. Владимирцева,
О. И. Одинцова**

ОЧИСТКА СТОЧНЫХ ВОД ТЕКСТИЛЬНЫХ ПРЕДПРИЯТИЙ С ПРИМЕНЕНИЕМ АЛЮМОСИЛИКАТОВ

Ключевые слова: красители, алюмосиликаты, очистка сточных вод, модификация.

В обзоре, основанном на публикациях в российских и зарубежных изданиях, представлены возможные варианты использования алюмосиликатных сорбентов для удаления красителей, поверхностно-активных веществ и ТВВ из сточных вод подготовительных, красильных и отделочных цехов текстильных предприятий. Слоистая структура природных минералов, их высокая сорбционная активность, хорошие физические и химические характеристики, а также низкая стоимость, доступность, возможность вторичной переработки и в некоторых случаях регенерации, делают экономически целесообразным использование их в процессах очистки сточных вод после подготовки, окрашивания и отделки текстильных материалов. Известно, что основной проблемой, связанной с удалением сточных вод с предприятий текстильного производства, является их токсичность и цвет. Синтетические красители с большим трудом подвергаются биологическому разложению, и во многих случаях продукты их деструкции более опасны с экологической точки зрения, чем исходное вещество. Приведено теоретическое обоснование высоких сорбционных характеристик природных и модифицированных алюмосиликатов по отношению к красителям, приобретающим при растворении в воде положительный заряд (катионным). Однако, поскольку большинство используемых на современных предприятиях красителей являются анионными (прямые и активные) с их удалением зачастую возникают определенные сложности. Описаны как традиционные, так и современные методы решения проблемы, в том числе новые разработки кафедры химической технологии волокнистых материалов Ивановского государственного химико-технологического университета. Представленный анализ научно-технической литературы позволяет сделать вывод о том, что имеющаяся информация об использовании природных и модифицированных алюмосиликатов для обесцвечивания красителей и сорбции отделочных препаратов свидетельствует об эффективности их применения для улучшения экологической ситуации.

**F. A. Bykov, A. S. Odintsov, E. L. Vladimirtseva,
O. I. Odintsova**

WASTEWATER TREATMENT OF TEXTILE ENTERPRISES USING ALUMINOSILICATES

Key words: dyes, aluminosilicates, wastewater treatment, modification.

The review, based on publications in Russian and foreign publications, presents possible options for using aluminosilicate sorbents for the removal of dyes, surfactants and TVS from wastewater from preparatory, dyeing and finishing shops of textile enterprises. The layered structure of natural minerals, their high sorption activity, good physical and chemical characteristics, as well as low cost, availability, recycling and, in some cases, regeneration, make it economically feasible to use them in wastewater treatment processes after the preparation, dyeing and finishing of textile materials. It is known that the main problem associated with the disposal of wastewater from textile production plants is its toxicity and color. Synthetic dyes are difficult to biodegrade, and in many cases their degradation products are more environmentally hazardous than the original substance. A theoretical justification is given for the high sorption characteristics of natural and modified aluminosilicates in relation to dyes that acquire a positive charge (cationic) when dissolved in water. However, since most of the dyes used in modern enterprises are anionic (direct and active), certain difficulties often arise with their removal. Both traditional and modern methods of solving the problem are described, including new developments from the Department of Chemical Technology of Fiber Materials of the Ivanovo State University of Chemical Technology. The presented analysis of scientific and technical literature allows us to conclude that the available information on the use of natural and modified aluminosilicates for bleaching dyes and sorption of finishing preparations indicates the effectiveness of their use to improve the environmental situation.

Текстильная промышленность, являясь частью мировой экономики, сталкивается с серьезными вызовами, одним из которых является очистка сточных вод (СВ). В зависимости от вида производства, используемого сырья, оборудования, проводимых технологических процессов, возможности рециклинга воды количество образующихся стоков будет варьироваться в широких пределах. В научно-технической литературе есть достаточно полная информация о расходовании воды на разных стадиях отделочного производства и для облагораживания волокна, тканей и трикотажных полотен. В качестве примера можно привести сведения из статей [1-3], касающиеся

объема загрязненной воды, используемой при выпуске, например, 1 т ткани из полиакрилонитрила - 35 м³; шерсти - 70 м³; хлопчатобумажных — 100 м³. Основной проблемой при этом были и остаются органические красители разных классов – более 100 тыс. видов при общем объеме производства около 700 000 т. в год. Сбрасываемые текстильными предприятиями стоки отличаются цветом и токсичностью. Многие из сбрасываемых красителей отличаются высокой стойкостью к биологическому разложению, что делает традиционные методы очистки сточных вод малоэффективными. По данным из научно-технических публикаций в процессе окрашивания теряется до 25% красителей и из них более 20 %

падают в технические сливы [4-6]. При этом и сами красители и продукты их распада токсичны и являются канцерогенами и мутагенами для окружающей среды [7-10], нарушая экосистемы водоемов. Кроме того, окрашенные СВ портят внешний вид рек и озер, вызывая негативную реакцию общественности.

Водопотребление красильных и отделочных цехов составляет приблизительно от 70–400 м³ на тонну продукции [2, 4]. Считается [11-13], что в стоки при этом попадает до 90-95 % воды, используемой на технологические нужды. Кроме красителей в стоках могут присутствовать частицы волокон, примеси основных компонентов натурального волокна, остатки шлихты и замасливателей, поверхностно-активные вещества (ПАВ), и пр. [1–3]. Установлено, что в сточных водах красильно-отделочных производств может находиться более 50 видов как органических, так и неорганических экологически небезопасных соединений [14, 15]. Их очистка и грамотная утилизация в настоящее время является одной из наиболее актуальных задач.

Для решения этой проблемы совершенствуются традиционные и разрабатываются инновационные физико-химические методы очистки, которые по характеру воздействия условно можно разделить на две основные группы: метод удаления и метод деструкции [16,17]. В первом случае ведущими являются такие процессы как адсорбция, коагуляция, флокуляция и пр. Добавление специальных реагентов (коагулянтов, флокулянтов) приводит к слипанию мелких частиц красителей в более крупные образования (флокулы), которые легче удаляются из воды осаждением или флотацией. Использование различных адсорбентов, таких как активированный уголь, силикагель, природные минералы (бентонит, цеолиты), позволяет эффективно извлекать красители из сточных вод за счет их поглощения поверхностью адсорбента. Сюда же можно отнести и мембранные технологии - применение полупроницаемых мембран позволяет разделять СВ на очищенную воду и концентрат красителей.

Во втором случае основным процессом является окисление. В качестве окислителей используется озон (O₃), пероксид водорода (H₂O₂), перманганат калия (KMnO₄) и др. Активные частицы, разрушающие молекулы красителя могут генерироваться и с помощью электрохимических методов: электрокоагуляция, электроокисление, электрофлотация.

Следует отметить, что ни один из перечисленных методов не является универсальным решением проблемы. Наиболее эффективным подходом к очистке сточных вод текстильной промышленности является комплексное использование различных методов, что позволяет добиться высокой степени очистки и минимизировать негативное воздействие на окружающую среду.

Среди многообразия различных способов очистки СВ текстильных производств все большую популярность приобретают сорбционные процессы,

как наиболее универсальные и доступные с технологической и экономической точек зрения. Для их реализации применяется широкий круг сорбентов. Одним из вариантов, достаточно часто применяемых для очистки как производственных стоков, так и других продуктов, являются алюмосиликатные сорбенты. [18-21]. Они обладают большой удельной поверхностью и пористой структурой, что позволяет им эффективно поглощать различные загрязнения и токсичные вещества. Алюмосиликаты химически инертны, устойчивы к воздействию агрессивных сред и высоких температур, что облегчает их применение в широком диапазоне технологических параметров. Кроме того, глины являются распространенным природным материалом, что обуславливает их доступность и низкую стоимость по сравнению с синтетическими сорбентами. Отработанные минералы могут быть утилизированы без вреда для окружающей среды, а в некоторых случаях - регенерированы и использованы повторно, что снижает экономические затраты на очистку [22-25].

Многочисленные исследования, проведенные как в России, так и за рубежом [18-25], подтвердили эффективность применения природных алюмосиликатных сорбентов для очистки СВ.

При этом эффективность сорбционной очистки зависит от ряда факторов, которые необходимо учитывать при разработке и оптимизации процесса: химическая природа, размер и заряд молекул загрязнителя оказывают существенное влияние на его взаимодействие с сорбентом. Концентрация, форма нахождения (растворенная, коллоидная, взвешенная) и степень диссоциации загрязняющих веществ влияют на их доступность для сорбции [19-25].

Известно, что наибольшую ионообменную активность проявляют минералы, имеющие электрически неуравновешенную структуру [26]. Для них характерно изоморфное замещение катионов, находящихся в межслоевом пространстве. При этом на сколах и боковых поверхностях алюмосиликатов проявляется отрицательный заряд скомпенсированный обменными (Ca²⁺, Mg²⁺, Na⁺ и др.) или необменными (чаще всего K⁺) катионами. Процессы ускоряются в водной среде при «роспуске» минералов, когда межслоевое расстояние значительно увеличивается, и устраняются препятствия к передислокации ионов [27-30]. Именно по этой причине в научно-технической литературе особое внимание уделяется слоистым алюмосиликатам, таким как монтмориллонит, поскольку при набухании они приобретают наиболее высокую сорбционную активность. Кроме того, большинство исследователей сходятся во мнении, что эффективность таких сорбентов выше, если объект поглощения имеет положительный заряд, поскольку отрицательно заряженные поверхности сорбента имеют сравнительно большую площадь [28-32].

Обычно при изучении свойств сорбирующих материалов в качестве индикатора используют тиозиновый краситель метиленовый синий [32-34]. Диссоциируя в воде с выделением активного катиона, он легко поглощается монтмориллонитом не только на поверхности, но и в межслоевом

пространстве. Проблема в том, что этот краситель практически не используется для крашения текстильных материалов. Поэтому применение его в качестве модельного соединения дает неполное представление об активности сорбентов по отношению к органическим красителям других классов.

В работах [35-39] исследованы варианты применения бентонитов для удаления из СВ основных красителей. Были использованы монтмориллонитовые глины из месторождений, содержащих минералы, имеющие в составе примесей ионы Na^+ (аскангель, сарингюхское или огланлинское месторождения). Эффективность извлечения основных красителей из водной среды с такими бентонитами выше, чем с содержащими ионы Ca^{2+} .

В результате проведения широкого спектра исследований как у нас в стране, так и за рубежом были предложены варианты очистки СВ от катионных красителей [40-42]. При наличии в растворе 0,3 г/л минерала извлекается до 98-99 % красителя [33-35]. При этом исследователи старались максимально использовать местные минералы, как наиболее дешевое и доступное сырье.

В настоящее время на текстильных предприятиях чаще всего используются пигменты, активные и прямые красители, реже сернистые. Основные и катионные красители, которые чаще всего применяются в качестве объектов для изучения сорбционной активности алюмосиликатов, в практических технологиях используют крайне редко. Исследования, проводимые на кафедре химической технологии волокнистых материалов Ивановского государственного химико-технологического университета доказали возможность извлечения из сточных вод пигментов с применением природных сорбентов – глин [43-45]. Лучшие результаты были получены при использовании бентонита, минерала, обладающего слоистой структурой и высокой сорбционной активностью – растворы полностью обесцветились, УФ-спектрофотометрия доказала полное удаление красителей. С анионными водорастворимыми красителями – прямыми и активными - этого добиться не удалось [46-48]. Сложность поглощения их алюмосиликатами обусловлена относительно небольшой площадью поверхности, имеющей положительный заряд [27,31]. Поэтому для эффективной очистки необходимо, чтобы количество сорбента во много раз превышало количество извлекаемого компонента, что далеко не всегда можно реализовать.

Ранее, для очистки СВ от сложных окрашенных органических соединений, представляющих собой производные бензидина, дианизида, натриевые соли сульф- или карбоновых азосоединений и пр. (активные и прямые красители), предлагалось применять природные слоистых и слоистоленточные силикаты [35,49], обладающие развитой поверхностью и имеющие в своем составе группировки с высокой активностью типа $=\text{Al}-\text{OH}$, диссоциирующие в водной среде с выделением

активной группы $-\text{OH}$. Современные исследования подтверждают высокую эффективность такой очистки [50-54].

Выше уже упоминалось, что удаление из стоков анионных красителей сопряжено с большими сложностями, чем катионных. Тем не менее, существуют минералы, которые в силу специфики своего строения сорбируют и анионоактивные красители. Такими, например, являются иллиты и каолиновые минералы Туниского месторождения. Эксперименты показали, что полнота очистки стоков от красителей определяется условиями проведения процесса: начальной концентрацией красителя, температурой и кислотностью среды, временем контакта с адсорбентом и пр. [55-57].

Аналогичный подход используется при удалении из СВ металлосодержащих красителей. Известно, что в водной среде в зависимости от своего строения они могут присутствовать как в виде ионов (анионов или катионов), так и нейтральных соединений. Таким образом, для эффективного извлечения необходимо ориентироваться на поверхностный заряд адсорбентов. Если краситель приобретает в водной среде отрицательный заряд (производные ди- и трисульфокислот), он будет хорошо сорбироваться на тех же минералах, что и кислотные красители. Для комплексных соединений красителя с металлом, имеющих общий положительный заряд, необходимо подбирать сорбенты, аналогичные применяемым при очистке СВ от катионных красителей [55,56].

Чтобы повысить сорбционную активность алюмосиликатов и увеличить степень очистки стоков от анионоактивных красителей на кафедре ХТВМ ИГХТУ был предложен способ получения композиционных материалов на основе природных глин и текстильных волокон [57,58].

В исследовании использовались материалы разного химического строения: хлопчатобумажные (ХБ), шерстяные (Ш), полиэфирные (ПЭ), полиамидные (ПА), полиакрилонитрильные (ПАН). Полиэфирное волокно применялось в 2-х, отличающихся по структуре вариантах: нестабилизированное (I) и стабилизированное (II). На волокнистый материал при постоянном перемешивании в водной дисперсии наносился бентонит.

Доказательством закрепления порошка бентонита на текстильном материале служило повышение массы обработанного им волокна, а также микрофотографии, полученные при 300- кратном увеличении. В качестве примера на рис. 1 и 2 приведены микрофотографии полиэфирного волокна, полученные до и после обработки. В зависимости от химической природы текстильного материала на нем фиксируется от 0,25 до 5,5 вес.% минералов.

Фильтр, через который пропускается краситель, представляет собой плотно скрученный из волокна цилиндр длиной 30 мм, через который проходит раствор красителя. Применяли как модельный очищенный краситель метиленовый синий ($\text{C}_{16}\text{H}_{18}\text{ClN}_3\text{S}$), так и технический - прямой синий У с исходной концентрацией 0,007 г/л.

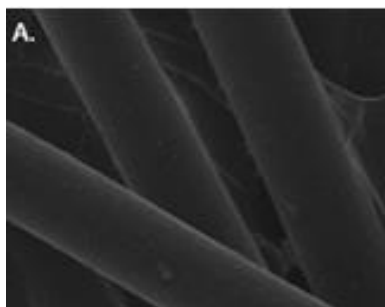


Рис. 1 – Микрофотография полиэфирного волокна

Fig. 1 – Microphotograph of polyester fibre

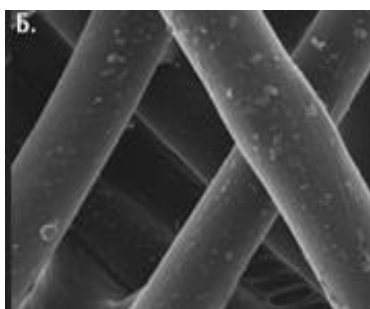


Рис. 2 – Микрофотографии полиэфирного волокна обработанного в дисперсии бентонита

Fig. 2 – Microphotographs of polyester fibre treated in bentonite dispersion

Как и следовало ожидать, закрепленный на волокне бентонит полностью удаляет из водной среды краситель метиленовый синий. С прямым красителем картина несколько другая: с одной стороны, удалось полностью очистить раствор от красителя, с другой стороны в этом случае большое влияние имеет природа фильтрующего материала. Отметим, что натуральные волокна - шерсть и хлопок – пусть не полностью, но довольно хорошо извлекают краситель из водной среды. В отличие от них, синтетический материал будет сорбировать краситель только в том случае, если на нем находятся частицы бентонита.

Таблица 1 - Изменение оптической плотности после фильтрации раствора красителя прямого синего У (исходная ОП=1,2)

Table 1 - Change of optical density (OD) after filtration of direct blue U dye solution (initial OD=1.2)

Вид волокна	Исходное	Обработка с бентонитом
Хлопок	0,1	0,003
Шерсть	0,2	0,002
Полиамид	1,1	0,1
Полиэфир	1,0	0,1
Полиакрилонитрил	1,1	0,5

В ходе исследований было установлено, что закрепленные на поверхности волокон частицы бентонита значительно повышают сорбционную активность текстильного материала по отношению к

красителям. Для натуральных материалов повышение составляет 10-20 %, а для химических 70-80 %.

Еще одним вариантом применения алюмосиликатов для очистки СВ может быть использование минералов в качестве активаторов окислительного разложения загрязняющих веществ и, в первую очередь, красителей [47,48]. В этом случае заряд красителей в водной среде не имеет значения. Для обесцвечивания раствора и разрушения красителя используется пероксид водорода, как наиболее доступный и безопасный окислитель. Из научно-технической литературы хорошо известно сочетание пероксида водорода и иона металла переменной валентности (чаще всего это Fe^{2+}) получившее название реагента Фентона. Он широко используется в процессах AOPs (Advanced Oxidation Processes) для окисления органических веществ и обесцвечивания синтетических красителей [59-64]. Многие природные алюмосиликаты содержат в качестве примесей соединения железа, инициируя, таким образом, процесс окисления. Процесс деструкции красителей путем AOPs, хорошо известен и описывается в ряде работ, в которых представлены различные схемы деструкции красителей. Последовательность разрушения красителей зависит от их класса, а также условий протекания процесса: времени, температуры, pH-среды, присутствия катализаторов и пр. [65-67]. При этом большинство исследователей сходятся в том, что в обесцвеченном растворе неизбежно остаются продукты распада - органические соединения, фиксируемые в УФ-области спектра. Зачастую такие продукты распада более опасны с точки зрения экологии, чем исходный краситель [17]. Высокая сорбционная способность алюмосиликатов обеспечивает эффективное удаление продуктов деструкции красителей, что доказывает спектральный анализ (Рис.3).

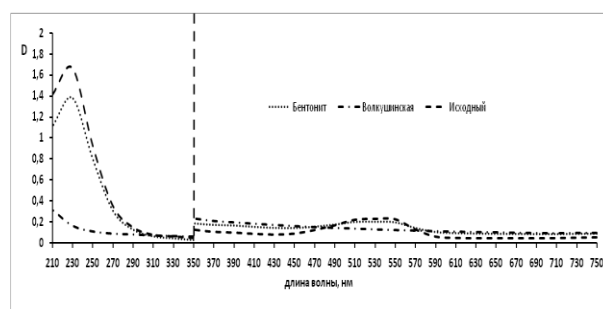


Рис. 3 – УФ-спектры поглощения растворов красителя активный ярко-красный 6С в присутствии алюмосиликатов и пероксида водорода

Fig. 3 – UV-vis absorption spectra of active bright red 6C dye solutions in the presence of aluminosilicates and hydrogen peroxide

В настоящее время основным путем повышения сорбционной активности по отношению к анионным красителям природных алюмосиликатов является их модификация. Существует множество способов модификации характеристик минералов для

улучшения качества очистки СВ от красителей ПАВ и ТВВ [68,69]. Условно все их можно разделить на три типа:

- физические - воздействие ультразвуком, механоактивация, гидротермальная активация и пр;
- химические - обработка растворами солей, щелочей, органических и минеральных кислот;
- физико-химические - совмещающие предыдущие два типа.

Применение кислотно-активированной глины для удаления из СВ основных, кислотных, дисперсных, прямых и активных красителей описано в работах [70,71]. Отмечено, что действие кислоты на глину проявляется не только в замещении катионов металлов, обладающих обменной способностью на ионы водорода, но и в изменении химических свойств и структуры поверхности. При замене катиона трехвалентного алюминия на ион водорода увеличивается объем пор и удельная поверхность минерала, приобретает кислотность. Наибольшую адсорбционную активность такая глина проявляет по отношению к основным красителям, и носитель был предложен в качестве эффективной адсорбционной среды для их удаления из водного раствора [72].

Обработка глинистых минералов растворами щелочей, как показано в работах [73,74] приводит к значительному повышению их сорбционной активности. Данный эффект обусловлен комплексом процессов, протекающих на поверхности глинистых частиц: щелочная обработка способствует замещению двухвалентных катионов (Ca^{2+} , Mg^{2+}) слабо связанных с поверхностью глины, на ионы натрия (Na^+) из раствора. Это приводит к увеличению суммарного количества обменных катионов и, следовательно, к повышению обменной емкости [73]. Щелочная среда сдвигает равновесие в системе "карбонат кальция - гидрокарбонат кальция" в сторону образования нерастворимого карбоната кальция (CaCO_3). Этот процесс также способствует вытеснению двухвалентных катионов ионами натрия. Повышение концентрации ионов натрия в диффузном слое глинистых частиц приводит к увеличению их электрокинетического потенциала, что закономерно снижает силы притяжения между частицами, препятствуя их агрегации и седиментации [74]. При этом сохраняется высокий уровень удельной поверхности сорбента. Помимо ионного обмена, щелочная обработка может стимулировать другие поверхностные явления, способствующие повышению сорбционной активности, такие как сорбция гидроксильных ионов (OH^-) и поверхностный пиролиз [75].

Введение поликатионов железа (III) в структуру глинистых минералов представляет собой еще один перспективный подход к созданию эффективных сорбентов. Глины, модифицированные солями железа (III), обладают хорошей сорбционной активностью при удалении из воды широкого спектра загрязнителей, включая неионогенные поверхностно-активные вещества (ПАВ) и красители [76, 77]. Например, в работе [76] подробно изучена сорбция красителя Direct Orange 34 модифицированными тунискими глинами.

Механизм действия модифицированных железом глин основан на образовании прочных комплексов между ионами железа (III) и функциональными группами органических загрязнителей. Ионы Fe^{3+} обладают высокой способностью к комплексообразованию с атомами кислорода, азота и серы, присутствующими в молекулах многих органических загрязнителей.

Физическая модификация глинистых минералов, также, как и химическая, в первую очередь направлена на повышение их сорбционной активности [78-81]. В работе [78] продемонстрировано, что облучение водной дисперсии глины дозами 20-30 кГр приводит к деструкции присутствующей в ней растительной органики, а также частичному гидролизу и радиолизу с образованием перекиси водорода. Эти процессы способствуют увеличению удельной поверхности глины и улучшению ее сорбционных свойств, сохраняя при этом пластичность. Недостатком метода является высокая стоимость и сложность реализации в промышленных масштабах.

Способ механоактивации, описанный в публикации [68], основан на измельчении глинистых материалов в специальных аппаратах – вибромельницах, дезинтеграторах и др. В результате механоактивации происходит не только тонкое и сверхтонкое диспергирование, но и изменение структуры поверхности глинистых частиц, что приводит к увеличению их реакционной способности. Эффективность механоактивации возрастает при ее сочетании с химическими методами обработки, например, обработкой щелочами, кислотами или растворами солей металлов [69].

Обработка глин кислотами (обычно соляной или серной) позволяет удалить примеси, такие как карбонаты и оксиды железа, а также увеличить удельную поверхность и изменить кислотно-основные свойства материала. Растворы щелочей (NaOH , KOH) приводит к увеличению pH на поверхности глины, что способствует адсорбции анионных загрязнителей. Введение в глинистую матрицу катионов металлов (Fe^{3+} , Al^{3+} , и др.) изменяет поверхностный заряд, увеличивает количество активных центров и улучшает сорбционные свойства по отношению к анионным ПАВ и красителям [76, 77, 80,81]. Обработка глин органическими соединениями, такими как четвертичные аммониевые соли, позволяет изменить гидрофобно-гидрофильный баланс поверхности и улучшить сорбционные свойства по отношению к органическим загрязнителям. Важно отметить, что выбор оптимального метода модификации зависит от конкретного типа глины, природы загрязнителей и требований к конечному продукту.

Воздействие ультразвука на глинистую суспензию вызывает кавитацию – образование и схлопывание микропузырьков, что способствует разрушению крупных агрегатов глинистых частиц, увеличению удельной поверхности и улучшению сорбционных свойств. Как и в случае механоактивации, эффективность ультразвуковой

обработки повышается при ее сочетании с химическими методами модификации [68].

Изучение российской и зарубежной научно-технической литературы убедительно подтверждает тот факт, что модифицированные глины демонстрируют значительно более высокую сорбционную емкость и селективность по сравнению с природными. Методы модификации, как правило, экологически безопасны и не приводят к образованию токсичных отходов. Модификация глинистых минералов открывает широкие возможности для создания эффективных и экономичных сорбентов для очистки сточных вод от различных загрязнителей. Дальнейшие исследования в этой области должны быть направлены на оптимизацию методов модификации, разработку новых композитных материалов на основе глин, а также на детальное изучение механизмов сорбции различных загрязнителей.

Работа выполнена в рамках Государственного задания на выполнение НИР, тема № FZZW-2023-0008 с использованием ресурсов Центра коллективного пользования научным оборудованием ИГХТУ (при поддержке Минобрнауки России, соглашение № 075-15-2021-671)

Литература

1. В.Н. Ануфриев, *Экология на предприятии*, 1, 87–96, (2015).
2. С.Л. Белопухов, М.А. Яшин, В.И. Слюсарев, Е.Э. Нефедьева, И.Г. Шайхиев, *Вестник Казанского технологического университета*, 18, 5, 199–204, (2015).
3. В.Н. Штепа, С.Ю. Киреев, А.В. Козырь, А.Б. Шикунец, Л.В. Наумов, С.Н. Киреева, *Гальванотехника и обработка поверхности: научный журнал*, 30, 4, 48–56 (2022).
4. С. Zaharia, D. Suteu, *Critical Overview*. 10.5772/32373 (2012).
5. A. Baban, A. Yediler, N.K. Ciliz, *Clean*, 38, 1, 84-90 (2010).
6. J. Lin, W. Ye, M. Xie, *Nat Rev Earth Environ* 4, 785–803 (2023).
7. D. Suteu, C. Zaharia, T. Malutan, In: *Lignin: Properties and Applications in Biotechnology and Bioenergy*, Nova Science Publishers, New York, 2011. P. 27.
8. D. Suteu, C. Zaharia, T. Malutan, *Journal of the Serbian Chemical Society*, 178, 3, 907-924, (2011).
9. A. Tkaczyk, K. Mitrowska, A. Posyniak, *Total Environ*. 717, 137-222, (2020).
10. B. Lellis, C.Z. Fávoro-Polonio, J.A. Pamphile, J.C. Polonio, *Biotechnol. Res. Innov.* 3, 275–290 (2019).
11. A. Berteau, A.P. Berteau, *Decolorisation and recycling of textile wastewater (in Romanian)*, Performantica Ed, Iasi, Romania, 2008.
12. I.A.E. Bisschops, H. Spanjers, *Environmental Technology*, 24, 1399-1411, (2003).
13. U. Ewuzie *J. Water Process Eng.* 50, 103-273 (2022).
14. И. Ш. Абдуллин, Е. С. Нефедьев, Р. Г. Ибрагимов, В. В. Парошин, О. В. Зайцева, *Вестник Казанского технологического университета*, 16, 3, 22–27, (2013).
15. Я.М. Грушко *Вредные органические соединения в промышленных сточных водах*. Л: Химия, 1982.
16. А.А. Abduova, Zh.U., Myrhalaykov, V.M. Janpaizova, M.I. Satayev, *Textile Industry Technology Scientific and Technical Journal*, 1, 122-135 (2015).
17. А.И. Родионов, В.Н. Клушин, Н.С. Торочешников, *Техника защиты окружающей среды*. Химия, Москва, 1989. 512 с.
18. M. Kaloo, B. Bhat, G. Sheergojri, T. Seh, *Material Science Research India*. 15. 141-144. (2018).
19. Z. Zango, A. Garba, Z. Garba, Z. Uba, U. Muttaqa, F. Usman, J.W. Lim, *Sustainability*. 14. 16441. 10.3390/su142416441, (2022).
20. Г.П. Хараев, Г.И. Хантургаева, С.Л. Захаров, *Безопасность жизнедеятельности*, 2, 29- 32, (2007).
21. Т.В. Шевченко, М.Р. Мандзий, Ю.В.Тарасова, *Экология и промышленность России*, 1, 35-37, (2003).
22. Е. Г. Куковский, *Особенности строения и физико-химические свойства глинистых минералов*. Наукова думка, Киев, 1966. 128 с.
23. F. Uddin, *Metallurgical and Materials Transactions*, 39,12, 2804-2814, (2008).
24. У. Уорелл, *Глины и керамическое сырье*. Мир, Москва, 1978. 236 с.
25. В.Н. Соколов, *Формирование микроструктуры глинистых грунтов в ходе прогрессивного литогенеза*, М.: МГУ, 1993. С. 26-41.
26. Б. П. Никольский, В. И. Парамонова, *Успехи химии*, 8, 10. 1535-1565, (1939).
27. Н. М. Бобкова, Е. М. Дятлова, Т.С. Куницкая, *Общая технология силикатов*. Высш. шк., Москва, 1987. 286 с.
28. С. Ма, R. A. Eggleton, *Clays and Clay Minerals*, 47, 2, 174-180, (1999).
29. S. A. Evtuykhov, V. G. Berezyuk, *Russian Journal of Applied Chemistry*, 76, 9, P.1414-1417, (2003).
30. Ю. И. Тарасевич, Д. А. Крысенко, В. Е. Поляков, *Коллоидный журнал*, 75, 5, 662-678 (2013).
31. В. Н. Соколов, *Соросовский образовательный журнал*, 6, 9, 59-65, (2000).
32. B. Kuschel, W. Gille, W. Schweiger, *Colloid Polym Sci*, 278, 805-809, (2000).
33. P.Nepal, S. Parajuli, G. Awasthi, K. Sharma, H. Oli, R. Shrestha, D. Bhattarai, *Journal of Nanotechnology*, 1-15. (2024). 10.1155/2024/6896986.
34. A. Bekru, L.T. Tufa, O.A. Zeleke, M. Goddati, J. Lee, F. Sabir, *ACS Omega*. 7. 10.1021/acsomega.2c02687. (2022).
35. С. Грег, К. Синг. *Адсорбция, удельная поверхность, пористость*. Мир, Москва, 1984. 310 с.
36. Т.М. Рощина, *Соросовский образовательный журнал*, 2, 89-94, (1998).
37. А. В. Кисилев, В. Н. Лыгин *Основные проблемы теории физической адсорбции*. Наука, Москва, 1970. 151 с.
38. Н.И. Залевский, В.Т. Быков, В сб. *Методы исследования структуры высокодисперсных и пористых тел*, АН СССР, Москва, 1958. С. 267-271.
39. Фенелонов В.Б. *Введение в физическую химию формирования супрамолекулярной структуры адсорбентов и катализаторов*, СО РАН, Новосибирск, 2004. 442 с.
40. A. Ghosh, S. Ram, S. Ram, *Clay Research*. 31. 243-250 (2012).
41. M.Onay, C. Özdemir, *Journal of Engineering and Natural Sciences Malatya Turgut Ozal University*. 10.46572/naturengs.1120218. (2022).
42. H. Souhassou, Y. Fahoul, I. El Mrabet, El Mustafa Iboustaten, A. Ouissal, N. Loubna, O. Mertah, A. Kherbeche, *Journal of the Iranian Chemical Society*, 21. 10.1007/s13738-023-02924-5, (2023).
43. А.И. Григорьева, Е.Л. Владимирцева, Л.В. Шарнина, *Вестник молодых ученых СПГУТД*, 1, 70-76, (2016).
44. А.И. Григорьева, Е.Л. Владимирцева, Л.В. Шарнина, *Вестник Казанского технологического университета*, 19, 19,116-120, (2016).
45. Е.Л. Владимирцева, Л.В. Шарнина *Перспективы применения алюмосиликатов в текстильно-отделочном*

- производстве, ФГБОУ ВО Иван. гос. хим.-технол. ун-т, Иваново, 2016. 142 с.
46. М.А. Вельбой, Е.Л. Владимирцева, Л.В. Шарнина, Э.Г. Шамсуддинова, *Известия высших учебных заведений. Технология легкой промышленности*, 2, 28-32, (2014).
 47. М.А. Вельбой, Е.Л. Владимирцева, Л.В. Шарнина, А.И. Григорьева, *Известия высших учебных заведений. Химия и химическая технология*, 57, 3, 81-86, (2014).
 48. Е.Л. Владимирцева, Л.В. Шарнина, М.А. Вельбой, Г.Н. Нуруллина, *Вестник Казанского технологического университета*, 17, 6, 59-62, (2014).
 49. R. M. Barrer, *L. Acad. Press*, 497, (1978).
 50. N. Abidi, J. Duplay, A. Jada, *Comptes Rendus Chimie*, 22, 1-13, (2018).
 51. N. Abidi, J. Duplay, A. Jada, *Arabian Journal of Geosciences*, 10, 742-750, (2017).
 52. N. Abidi, J. Duplay, F. Ayari, *Desalination and water treatment*, 54, 1-16, (2014).
 53. N. Abidi, J. Duplay, C. Kleitz, *Journal of Colloid Science and Biotechnology*, 5, 2, 145-156, (2016).
 54. N. Abidi, J. Duplay, A. Jada, *Desalination and water treatment*, 57, 1-15, (2017).
 55. М.А. Nameed, *Use of a Specific Type of Bentonite Clay for the Removal of Reactive Dyes*, 4, 297-302, (2018).
 56. M. Blachnio, M. Zienkiewicz-Strzałka, A. Derylo-Marczewska, L. Nosach, E. Voronin, *International Journal of Molecular Sciences*. 24. 11818. 10.3390/ijms241411818. (2023).
 57. Ф.А. Быков, Е.Л. Владимирцева В сб. *Физика волокнистых материалов: структура, свойства, наукоёмкие технологии и материалы (SMARTEX)* ИВГПУ, Иваново, 2022. С. 98-101.
 58. Ф.А. Быков, Е.Л. Владимирцева, Н.Л. Овчинников, М.Ф. Бутман, О.И. Одинцова, *Известия высших учебных заведений. Технология текстильной промышленности*, 406, 5, 123-128, (2023).
 59. R. Munter, *Proc. Estonian Acad. Sci. Chem.*, 50, 2, 59-80, (2001).
 60. S. Korhonen, T. Tuhkanen, *Tappi J.*, 83, 1-15, (2000).
 61. F. Beltran, G. Ovejero, J. Encinar, J. Rivas, *Ind. Eng. Chem. Res.*, 34, 1596-1600, (1995).
 62. F. Beltran, G. Ovejero, J. Garcia-Araya, J. Rivas, *Ind. Eng. Chem. Res.* 34, 1607-1611, (1995).
 63. T.Y. Way, C.C. Wan, *Ind. Eng. Chem. Res.*, 30, 1293-1300, (1991).
 64. J.F. Klausner, D.Y. Goswami, *AIChE Symp. Ser., Heat Transfer, Atlanta*, 89, 445-451, (1995).
 65. Y.H. Lee, R.D. Matthews, S.G. Pavlostathis, *Water Environ Res*, 78, 2, 156-169, (2006).
 66. W.Z. Tang, H. An, *Chemosphere*, 31, 9, 4157-4170, (1995).
 67. M.M. Hassan, C J . Hawkyard, *J Chem Technol Biotechnol* 77, 7, 834-841, (2002).
 68. F. Bergaya, G. Lagaly, *Applied clay Science*, 19, 1-3, (2001).
 69. Ю. И. Тарасевич, *Природные сорбенты в процессах очистки воды*. Наукова Думка, Киев, 1981. 212 с.
 70. Н.А. Ходосова, К.А. Пряженцева, С.А. Зотова, *Научный вестник ВГАСУ. Серия: Высокие технологии. Экология*, 1, 130-136, (2016).
 71. Yu. Danchenko, V. Andronov, E. Rybka, *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 4, 12, 17-25, (2017).
 72. K. G. Bhattacharyya, S.S. Gupta, *Advances in Colloid and Interface Science*, 140, 114-131, (2008).
 73. S. Rouzière, M. S. Amara, E. Paineau, *Developments in Clay Science*, 7, 254-278, (2016).
 74. R.S. Juang, F.C. Wu, R.L. Tseng, *Environ Technol*, 18, 525, 31, (1997).
 75. A. Kicińska, R. Pomykała, *Sci Rep*, 13, 22519 (2023).
 76. В. Е. Дорошенко *Химия и технология воды*, 11, 5, 500-503, (1989).
 77. С. Ц. Ханхасаева, С. В. Бадмаева, Э. Ц. Дашинамжилова, *Химия в интересах устойчивого развития*, 14, 3, 311-318, (2006).
 78. М. Ю. Трифонова, С. А. Доленко, С. В. Бондаренко, *Коллоидный журнал*, 73, 4, 529-534, (2011).
 79. R.A. Schoonheydt, C.T. Johnston, *Developments in clay science*, 1, 87-113, (2006).
 80. Р. И. Злочевская, Р. С. Зиангиров, Е. М. Сергеев, В сб. *Связанная вода в дисперсных системах*. Вып. 1, 102-138, (1970).
 81. В. В. Наседкин, Ф. С. Кваша, В. В. Стаханов. *Бентонит в промышленности России*, ГЕОС, Москва, 2001. 136 с.

References

- 1.1. V.N. Anufriev, *Ecology at the enterprise*, 1, 87-96, (2015).
- 2.S.L. Belopukhov, M.A. Yashin, V.I. Slyusarev, E.E. Nefedieva, I.G. Shaikhiev, *Herald of Technological University*, 18, 5, 199-204, (2015).
- 3.V.N. Shtepa, S.Y. Kireev, A.V. Kozyr, A.B. Shikunets, L.V. Naumov, S.N. Kireeva, *Galvanotechnics and surface treatment: scientific journal*, 30, 4, 48-56, (2022).
- 4.S. Zaharia, D. Suteu, *Critical Overview*. 10.5772/32373 (2012).
- 5.A. Baban, A. Yediler, N.K. Ciliz, *Clean*, 38, 1, 84-90 (2010).
- 6.J. Lin, W. Ye, M. Xie, *Nat Rev Earth Environ* 4, 785-803 (2023).
- 7.D. Suteu, C. Zaharia, T. Malutan, In: *Lignin: Properties and Applications in Biotechnology and Bioenergy*, Nova Science Publishers, New York, 2011. P. 27.
- 8.D. Suteu, C. Zaharia, T. Malutan, *Journal of the Serbian Chemical Society*, 178, 3, 907-924, (2011).
- 9.A. Tkaczyk, K. Mitrowska, A. Posyniak, *Total Environ.* 717, 137-222, (2020).
10. B. Lellis, C. Z. Fávoro-Polonio, J.A. Pamphile, J.C. Polonio, *Biotechnol. Res. Innov.* 3, 275-290 (2019).
11. A. Bertea, A.P. Bertea, *Decolorisation and recycling of textile wastewater (in Romanian)*, Performantica Ed, Iasi, Romania, 2008.
12. I.A.E. Bisschops, H. Spanjers, *Environmental Technology*, 24, 1399-1411, (2003).
13. U. Ewuzie, *J. Water Process Eng.* 50, 103-273 (2022).
14. I. Sh. Abdullin, E. S. Nefediev, R. G. Ibragimov, V. V. Paroshin, O. V. Zaitseva, *Herald of Kazan Technological University*, 16, 3, 22-27, (2013).
15. Ya.M. Grushko *Harmful organic compounds in industrial wastewater*. L: Khimiya, 1982.
16. A.A. Abduova, Zh.U., Myrhalykov, V.M. Janpaizova, M.I. Satayev, *Textile Industry Technology Scientific and Technical Journal*, 1, 122-135 (2015).
17. A.I. Rodionov, V.N. Klushin, N.S. Torocheshnikov, *Technics of Environmental Protection*. Chemistry, Moscow, 1989. 512 с.
18. M. Kaloo, B. Bhat, G. Sheergojri, T. Seh, *Material Science Research India*. 15. 141-144. (2018).
19. Z. Zango, A. Garba, Z. Garba, Z. Uba, U. Muttaqa, F. Usman, J.W. Lim, *Sustainability*. 14. 16441. 10.3390/su142416441, (2022).
20. G.P. Kharaev, G.I. Khanturgaeva, S.L. Zakharov, *Life Safety*, 2, 29- 32, (2007).
21. T.V. Shevchenko, M.R. Mandzii, Y.V. Tarasova, *Ecology and Industry of Russia*, 1, 35-37, (2003).
22. E. G. Kukovsky, *Features of structure and physicochemical properties of clay minerals*. Naukova Dumka, Kiev, 1966. 128 p.
23. F. Uddin, *Metallurgical and Materials Transactions*, 39, 12, 2804-2814, (2008).
24. Y. Worrell, *Clays and ceramic raw materials*. Mir, Moscow, 1978. 236 p.

25. V.N. Sokolov, *Formation of microstructure of clayey soils during progressive lithogenesis*, Moscow: MSU, 1993. P. 26-41.
26. B. P. Nikolsky, V. I. Paramonova, *Uspekhi chemii*, **8**, 10, 1535-1565, (1939).
27. N. M. Bobkova, E. M. Dyatlova, T. S. Kunitskaya, *General technology of silicates*. Vysh. shk, Moscow, 1987. 286 p.
28. C. Ma, R. A. Eggleton, *Clays and Clay Minerals*, **47**, 2, 174-180, (1999).
29. S. A. Evtukhov, V. G. Berezyuk, *Russian Journal of Applied Chemistry*, **76**, 9, P.1414-1417, (2003).
30. Yu. I. Tarasevich, D. A. Krysenko, V. E. Polyakov, *Colloid Journal*, **75**, 5, 662-678, (2013).
31. V. N. Sokolov, *Soros Educational Journal*, **6**, 9, 59-65, (2000).
32. B. Kuschel, W. Gille, W. Schweiger, *Colloid Polym Sci*, **278**, 805-809, (2000).
33. R.Nepal, S. Parajuli, G. Awasthi, K. Sharma, H. Oli, R. Shrestha, D. Bhattarai, *Journal of Nanotechnology*, 1-15. (2024). 10.1155/2024/6896986.
34. A. Bekru, L.T. Tufa, O.A. Zelekew, M. Goddati, J. Lee, F. Sabir, *ACS Omega*. 7. 10.1021/acsomega.2c02687. (2022).
35. C. Greg, K. Sing. *Adsorption, specific surface area, porosity*. Mir, Moscow, 1984. 310 p.
36. T.M. Roshchina, *Soros Educational Journal*, 2, 89-94, (1998).
37. A. B. Kisilev, V. N. Lygin *Basic problems of the theory of physical adsorption*. Nauka, Moscow, 1970. 151 p.
38. N.I. Zalevskii, V.T. Bykov, In V sb. *Methods of investigation of the structure of highly dispersed and porous bodies*, USSR Academy of Sciences, Moscow, 1958. P. 267-271.
39. Fenelonov, V.B. *Introduction to Physical Chemistry of Supramolecular Structure Formation of Adsorbents and Catalysts*, SB RAS, Novosibirsk, 2004. 442 p.
40. A. Ghosh, S. Ram, S. Ram, *Clay Research*. **31**. 243-250 (2012).
41. M.Onay, C. Özdemir, *Journal of Engineering and Natural Sciences Malatya Turgut Ozal University*. 10.46572/naturengs.1120218. (2022).
42. H. Souhassou, Y. Fahoul, I. El Mrabet, El Mustafa Iboustaten, A. Ouissal, N. Loubna, O. Mertah, A. Kherbeche, *Journal of the Iranian Chemical Society*, 21. 10.1007/s13738-023-02924-5, (2023).
43. A. I. Grigorieva, E. L. Vladimirtseva, L.V. Sharnina, *Bulletin of Young Scientists of SPSUTD*, 1, 70-76, (2016).
44. A.I. Grigorieva, E.L. Vladimirtseva, L.V. Sharnina, *Herald of Technological University*, **19**, 19,116-120, (2016).
45. E.L. Vladimirtseva, L.V. Sharnina *Perspectives of application of aluminosilicates in textile and finishing production*, FGBOU VO Ivan. gos. chem.-technol. un-unit, Ivanovo, 2016. 142 p.
46. M.A. Velboy, E.L. Vladimirtseva, L.V. Sharnina, E.G. Shamsuddinova *Izvestiya vysshee obrazovaniya vysshee obrazovaniya. Technology of light industry*, 2, 28-32, 2014.
47. M.A. Velboy, E.L. Vladimirtseva, L.V. Sharnina, A.I. Grigorieva, *Izvestiya vysshee obucheniya vysshee obrazovaniya. Chemistry and chemical technology*, **57**, 3, 81-86, (2014).
48. E.L. Vladimirtseva, L.V. Sharnina, M.A. Velboy, G.N. Nurullina, *Herald of Kazan Technological University*, **17**, 6, 59-62, (2014).
49. R. M. Barrer, *L. Acad. Press*, 497, (1978).
50. N. Abidi, J. Duplay, A. Jada, *Comptes Rendus Chimie*, **22**, 1-13, (2018).
51. N. Abidi, J. Duplay, A. Jada, *Arabian Journal of Geosciences*, **10**, 742-750, (2017).
52. N. Abidi, J. Duplay, F. Ayari, *Desalination and water treatment*, **54**, 1-16, (2014).
53. N. Abidi, J. Duplay, C. Kleitz, *Journal of Colloid Science and Biotechnology*, **5**, 2,145-156, (2016).
54. N. Abidi, J. Duplay, A. Jada, *Desalination and water treatment*, **57**, 1-15, (2017).
55. M.A. Hameed, *Use of a Specific Type of Bentonite Clay for the Removal of Reactive Dyes*, 4, 297-302. (2018).
56. M. Blachnio, M. Zienkiewicz-Strzałka, A. Derylo-Marczewska, L. Nosach, E. Voronin, *International Journal of Molecular Sciences*. 24. 11818. 10.3390/ijms241411818. (2023).
57. F.A. Bykov, E.L. Vladimirtseva V sb. *Physica fibre materials: structure, properties, science-intensive technologies and materials*(SMARTEX) IVHPU, Ivanovo, 2022. P. 98-101.
58. F.A. Bykov, E.L. Vladimirtseva, N.L. Vladimirtseva. Vladimirtseva, N.L. Ovchinnikov, M.F. Butman, O.I. Odintsova, *Izvestiya vysshee obrazovaniya. Technology of textile industry*, **406**, 5, 123-128, (2023).
59. R. Munter, *Proc. Estonian Acad. Sci. Chem.*, **50**, 2, 59-80, (2001).
60. S. Korhonen, T. Tuhkanen, *Tappi J.*, **83**, 1-15, (2000).
61. F. Beltran, G. Ovejero, J. Encinar, J. Rivas, *Ind. Eng. Chem. Res.*, **34**, 1596-1600, (1995).
62. F. Beltran, G. Ovejero, J. Garcia-Araya, J. Rivas, *Ind. Eng. Chem. Res.* **34**, 1607-1611, (1995).
63. T.Y. Way, C.C. Wan, *Ind. Eng. Chem. Res.*, **30**, 1293-1300, (1991).
64. J.F. Klausner, D.Y. Goswami, *AIChE Symp. Ser., Heat Transfer, Atlanta*, **89**, 445-451, (1995).
65. Y.H. Lee, R.D. Matthews, S.G. Pavlostathis, *Water Environ Res*, **78**, 2, 156-169, (2006).
66. W.Z. Tang, N. An, *Chemosphere*, **31**, 9, 4157-4170, (1995).
67. M.M. Hassan, C J . Hawkyard, *J Chem Technol Biotechnol* **77**, 7, 834-841, (2002).
68. F. Bergaya, G. Lagaly, *Applied clay science*, 19, 1-3, (2001).
69. Yu. I. Tarasevich, *Natural sorbents in water purification processes*. Naukova Dumka, Kiev, 1981. 212 p.
70. I. N.A. Khodosova, K.A. Pryazhentseva, S.A. Zotova, *Scientific Bulletin of VGASU. Series: High technologies. Ecology*, 1, 130-136, (2016).
71. Yu. Danchenko, V. Andronov, E. Rybka, *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, **4**, 12, 17-25, (2017).
72. K. G. Bhattacharyya, S. S. Gupta, *Advances in Colloid and Interface Science*, **140**, 114-131, (2008).
73. S. Rouzière, M. S. Amara, E. Paineau, *Developments in Clay Science*, **7**, 254-278, (2016).
74. R. S. Juang, F. C. Wu, R. L. Tseng, *Environ Technol*, **18**, 525, 31, (1997).
75. A. Kicińska, R. Pomykała, *Sci Rep*, **13**, 22519 (2023).
76. V. E. Doroshenko *Chemistry and Technology of Water*, **11**, 5, 500-503, (1989).
77. S. Ts. Khankhasaeva, S. V. Badmaeva, E. C. Dashinamzhilova, *Chemistry for Sustainable Development*, **14**, 3, 311-318, (2006).
78. M. Yu. Trifonova, S. A. Dolenko, S. V. Bondarenko, *Colloid Journal*, **73**, 4, 529-534, (2011).
79. R. A. Schoonheydt, C. T. Johnston, *Developments in clay science*, **1**, 87-113, (2006).
80. R. I. Zlochevskaya, R. S. Ziangirov, E. M. Sergeev, In Sb. *Bound water in disperse systems*. Vyp. 1, 102-138, (1970).
81. B. V. Nasedkin, F. S. Kvasha, V. V. Stakhanov. *Bentonite in the Industry of Russia*, GEOS, Moscow, 2001. 136 p.

© **Ф. А. Быков** – аспирант кафедры Химической технологии волокнистых материалов (ХТВМ), Ивановский государственный химико-технологический университет (ИГХТУ), Иваново, Россия, miss.askhabova@mail.ru; **А. С. Одинцов** – магистрант кафедры ХТВМ, ИГХТУ; **Е. Л. Владимирцева** – д-р техн. наук, профессор кафедры ХТВМ, ИГХТУ, elvladimirtseva@mail.ru; **О. И. Одинцова** – д-р техн. наук, зав. кафедры ХТВМ, ИГХТУ, odolga@yandex.ru.

© **F. A. Bykov** – PhD-student of the Department of Chemical Technology of Fibrous Materials (ChTFM), Ivanovo State University of Chemistry and Technology (ISUCT), Ivanovo, Russia, baiii1@mail.ru; **A. S. Odintsov** – Master-student of the ChTFM department, ISUCT; **E. L. Vladimirtseva** – Doctor of Sciences (Technical Sci.), Professor of the ChTFM department, ISUCT, elvladimirtseva@mail.ru; **O. I. Odintsova** – Doctor of Sciences (Technical Sci.), Head of the ChTFM department, ISUCT, odolga@yandex.ru.