

УДК624.131.414

Преобразование адсорбционных свойств бентонитовых глин путем комплексного техногенного воздействия

А. В. Анюхина^а, В. В. Середин^б, А. А. Миронова^б

^аПермский национальный исследовательский политехнический университет
614990, Пермь, ул. Комсомольский пр., 29. E-mail: anuhina.com@gmail.com

^бПермский государственный национальный исследовательский университет
614000, ул. Букирева, 15. E-mail: seredin@nedra.perm.ru

(Статья поступила в редакцию 6 сентября 2021 г.)

Получены результаты исследования бентонитовой глины на изменение показателя сорбции химической, термической и механической обработкой. Результаты показали, что при комплексной обработке образцов с механическим давлением температурой и катионными растворами наблюдается общая тенденция увеличения показателя сорбции. Установлено, что наибольшее воздействие на активацию сорбционных свойств оказывает вертикальное давление, термообработка образцов в 200°C и насыщение катионным раствором хлорида железа, что позволяет считать данную обработку образцов наиболее эффективной для образцов данного исследования.

Ключевые слова: бентонит, адсорбция, термообработка, химическая обработка, катионные растворы, вертикальное давление

DOI: 10.17072/psu.geol.20.4.326

Актуальность

Глины являются высокоэффективными адсорбентами, которые обладают сложным химическим составом, структурой и свойствами, также они просты в применении и легкодоступны (Осипов и др., 2013; Роде, 2008; Сергеев и др., 1973). Широкое применение бентонитовых глин нашлось в производстве керамики, упаковочного материала, строительных конструкций, тампонажа скважин, медицине и т.д.

К относительно перспективным и новым направлениям относится производство органоглин разного качества и назначения. В работе Наседкина В. В., Демиденко К. В. и др. (Наседкин и др., 2012; Gu, Kang, и др., 2019) описано, что применение органоглин в производстве пластмасс различного использования значительно увеличит показатели прочности, газопроницаемости и огнестойкости.

Высокая адсорбционная активность глинистых минералов связана со многими особенностями, такими как кристаллическое строение, минеральный, гранулометрический и химический состав (Долгов, 1943),

площадь удельной поверхности (Осипов, Соколов, 2013), энергетический потенциал (Алванян, Андрианов, Селезнева, 2020) и т.д. Согласно выводам, описанным в работе Ситевой О. С., Медведевой Н. А., Середина В. В., Алванян К. А. и др. (Siteva, Medvedeva и др., 2020), сорбционная способность глин напрямую зависит от гранулометрического состава глин и оказываемого при этом на них давления. По их мнению, с ростом степени сжатия глин наблюдается общая тенденция увеличения дефектности глинистых частиц.

Научный прогресс не стоит на месте, поэтому современные технологии применения глин на производстве, как эффективных сорбентов, требуют качественных и новых сорбционных материалов с высокой поглощательной способностью и избирательностью действия. Существует большое количество способов, методов, методик, технологий для повышения сорбционных характеристик глин (Наседкин и др., 2012; Середин и др., 2018; Dali и др., 2020). Обработка температурами (без изменения структуры до 200–300°C), механическая, ультрафиолетовая об-

работка, кислотная и ИК-обработка считаются наиболее эффективными (Анюхина и др., 2017; Анюхина, Середин и др., 2021; Злочевская Королев, 1977). В настоящее время есть интерес к использованию этих глин для удаления тяжелых металлов из промышленных стоков предприятий, так как преобразованная структура глин при термической обработке имеет большую химическую активность (Osorino-Rubio и др., 2016).

Несмотря на большой теоретический и экспериментальный материал, вопросы активации глин исследованы недостаточно полно. Поэтому **целью работы** является оценка влияния техногенного воздействия на адсорбционную активность бентонитовой глины.

Объект исследования – бентонитовые глины Зырянского месторождения Курганской области.

Экспериментальная часть исследования Методика и методы исследования

Для изучения влияния техногенного воздействия на формирование сорбционных свойств бентонитовой глины было выбрано 3 вида техногенного воздействия: механическое (физическое), термическое и химическое. Механическое воздействие осуществлялось при помощи прессового прибора путем вертикального сжатия (давления) и сдвига. Термическое воздействие заключалось в температурном нагреве образцов на разные пики температур. Химическая обработка

производилась насыщением образцов глин катионными растворами, концентрация которых составляла 0,1 н (моль-экв/л).

В методическом плане подготовка образцов выполнялась следующим образом:

Механическая обработка

Для подготовки образцов с давлением был выбран интервал от 10 до 800 МПа, всего подготовлено 25 ступеней давления с шагом между интервалами 5–50 МПа, то есть подготовлено 25 образцов с давлением (0 МПа, 10 МПа, 25 МПа и т.д.). Вес каждого образца составляет 10 грамм.

Термическая обработка

Термическая обработка осуществлялась при помощи высокотемпературной печи SNOL 12/1300. Подготовленные образцы глин с давлением подвергались отжигу в течение 2 часов при температуре 200°C одна партия образцов и при температуре 400°C другая партия образцов.

Химическая обработка

Химическая обработка производилась на протяжении 3-х суток с предварительным интенсивным взбалтыванием. Для эксперимента были выбраны катионные растворы хлорида калия, кальция и железа (KCl, CaCl₂, FeCl₃).

Все образцы после обработки выдерживались в эксикаторе с силикагелем с относительной влажностью воздуха в комнате φ=30% на протяжении 7 суток (Анюхина, Середин и др., 2021). Количество итоговых образцов приведено ниже в табл. 1.

Таблица 1. Количество подготовленных образцов бентонитовой глины для определения сорбционных показателей

Обработка	Количество образцов			
	Без химической обработки	KCl	CaCl ₂	FeCl ₃
P+200°C	25	25	25	25
P+400°C	25	25	25	25
Итог	200 штук			

*Примечание: P-образцы с обработкой вертикальным давлением

Адсорбционные исследования

Итоговые подготовленные образцы подвергались испытанию на определение величины адсорбции при помощи титрования

красителем метиленовой голубой или метиленовая синь (МГ). Концентрация красителя составила 3 мг/см³. Также испытанию были подвержены образцы без насыщения кати-

онными растворами на обе ступени термообработки (200 °С и 400 °С), для достоверности эксперимента. Общее количество подготовленных образцов составило 200 штук. Для каждого образца было выполнено по 3 испытания, согласно методике, описанной в ГОСТ 21283-93 (ГОСТ 21283-93, 1995).

Подготовка образцов и лабораторные испытания проводились в лаборатории химического корпуса Пермского государственного национального исследовательского университета аспирантом Анюхиной А. В.

Влияние давления и химической обработки глин при температурах отжига 200°С и 400°С на сорбционную активность глин

В ходе изучения влияния техногенной нагрузки на формирование сорбционных свойств бентонитовой глины диапазоны давлений были разделены на 2 класса: 1 класс – 0–150 МПа, 2 класс – 200–800 МПа. Деление классов осуществлялось на основании выполненных предыдущих экспериментов, описанных в работах (Лебедев, 1930; Seredin и др., 2020). По их мнению, при обработке глин давлением до 125 МПа происходит увеличение шероховатости на поверхности частиц. С увеличением давления от 125 МПа до 800 МПа закономерности изменения шероховатости на поверхности частиц оценить достаточно сложно, так как она имеет значительную изменчивость, что подтверждено математическими и статистическими расчетами результатов (Алванян и др., 2020).

Экспериментальные данные по влиянию давления на изменение показателя величины адсорбции приведены на рис. 1.

В процессе изучения влияния давления и температурного воздействия на сорбционную активность бентонитовой глины установлено, что для образцов двух ступеней термообработки в 200°С и 400°С с повышением давления сорбционная активность интенсивно увеличивается в 1 классе давлений. Во 2 классе также происходит увеличение, однако интенсивность роста показателя сорбции уменьшается.

Исходя из полученных графиков (рис. 1), наблюдается разнонаправленное воздействие катионных растворов на показатели сорбции для 1 класса давлений. Тем не менее наблю-

дается общая тенденция увеличения показателя сорбции во 2 классе давлений для всех исследуемых образцов, что связано со структурными изменениями на поверхности частиц.

С повышением величины давления происходит увеличение площади активной поверхности на поверхности частицы и кристаллита, которая характеризуется через показатели шероховатости (R_c) и толщины бездефектного кристаллита (M_k). Соответственно, чем выше показатель площади активной поверхности, тем выше показатель адсорбции (Seredin, Fyodorov и др., 2020; Seredin, Khrulev, 2016; Sruthi и др., 2019). Влияние химической обработки на формирование сорбционных свойств от давления изменчивое и разнонаправленное, что связано с минеральным и гранулометрическим составом, а также ионообменными процессами.

С увеличением валентности катионного раствора сорбция незначительно растёт.

Влияние химической обработки глин при температурах отжига в 200°С и 400°С на показатели сорбционной активности глин

В расположенной ниже таблице приведены значения показателя сорбции бентонитовой глины при термической и химической обработке катионными растворами *без обработки вертикальным давлением*.

Исходя из табл. 2, результаты показателя адсорбции для ступени термообработки в 400°С наблюдается постепенное увеличение. Для ступени термообработки в 200°С результаты показателя адсорбции принимают максимальные значения, что связано с наибольшим (освобождением) «оголением» глинистой частицы от слоя адсорбционно-связанной воды (Анюхина, Федоров, 2017), но при насыщении катионным раствором хлорида калия (KCl) адсорбция падает почти в 2 раза. Данный фактор связан с большими размерами катиона K^+ , в отличие от катионов Ca^{2+} и Fe^{3+} , который при сорбировании на глинистую частицу «обволакивает» ее поверхность, не попадая внутрь структуры, тем самым уменьшая сорбционные характеристики.

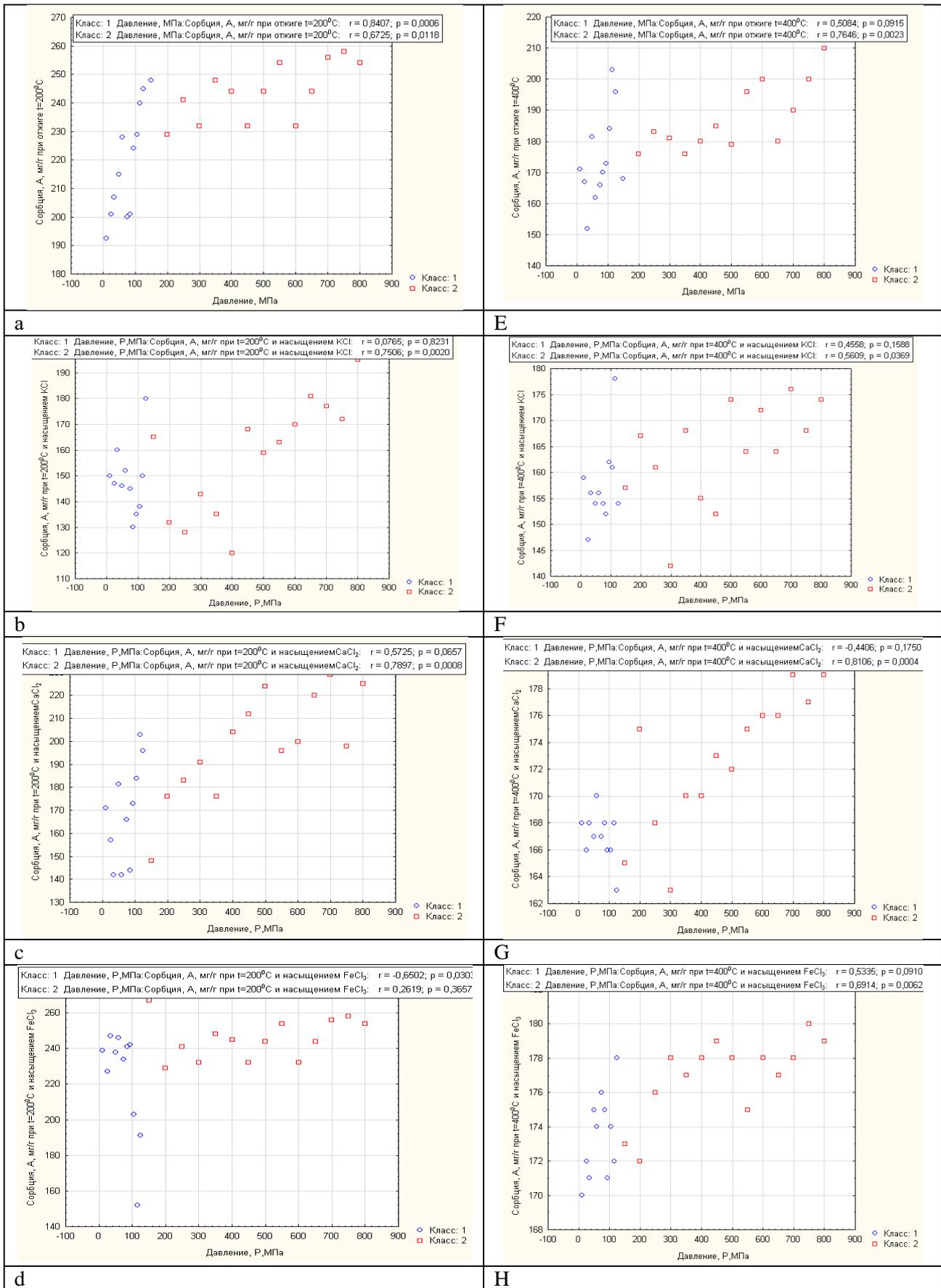


Рис. 1. Влияние давления на формирование сорбционных свойств образцов бентонитовой глины при термообработке в 200°C (а) и в 400°C (е) с насыщением катионными растворами (б, в, г, ж, з, и)

Таблица 2. Показатели адсорбции образцов глины с термо- и химической обработкой

Температура, t °С	Адсорбция, А, мг/г			
	Без химической обработки	Катионный рас- твор хлорида ка- лия (KCl)	Катионный рас- твор хлорида кальция (CaCl ₂)	Катионный рас- твор хлорида железа (FeCl ₃)
200 °С	194	108	143	122
400 °С	132	142	151	161

Тем не менее стоит отметить, что при насыщении катионами Ca²⁺ и Fe³⁺ сорбция увеличивается, так как происходит изоморфное замещение в структуре глин Si⁴⁺ и в некоторых случаях Al³⁺ (Kumar, Zhao, 2016; Liu, 2019; Mouni, 2018; Osorino-Rubio, 2016). Также прослеживается тенденция разнонаправленного изменения показателя с увеличением валентности катионного раствора для двух рассматриваемых ступеней термообработки.

Выявленные закономерности можно объяснить с позиций формирования диффузного слоя: его толщины и свойств (Злочевская, 1969), под воздействием температуры и обменных реакций между ионами – компенсаторами и катионами порового раствора. Активность ион-компенсаторов зависит от минерального состава глин и условий их формирования.

Различное поведение катионов в процессе ионного обмена иногда объясняется теорией гидратации катионов, согласно которой в водных растворах степень гидратации катионов возрастает с увеличением зарядов и уменьшением радиуса. Расположение ионов по обменному сродству в разбавленных растворах соответствует их порядку размещения в лиотропных рядах Гофмейстера (Анюхина, 2017; Анюхина 2017).

Однако стоит обратить внимание, что при сравнении результатов, приведенных в разделе выше, при исследовании образцов с вертикальным давлением показатель сорбции увеличивается для двух ступеней термообработки относительно образцов без давления.

Таким образом, установлено при воздействии техногенной нагрузки (давления, термической и химической обработки) увеличение сорбции бентонитовой глины. Сорбция в большей степени растет с увеличением валентности катионных растворов для

отожженных образцов температурой в 400 °С, для пика в 200 °С имеет разнонаправленную интенсивность увеличения.

Комплексная оценка влияния техногенной нагрузки на формирование показателя сорбции бентонитовой глины

Для комплексной оценки влияния техногенной нагрузки бентонитовой глины произведен анализ, показывающий в процентном соотношении влияние на сорбционные свойства рассматриваемых факторов для каждого выделенного класса давлений (табл. 3).

За исходные данные для расчета влияния техногенной нагрузки взяты результаты сорбции бентонитовой глины от давления, которые приняты за 100% и рассчитаны для каждого класса давлений. Рассчитано среднее значение сорбции. Также в табл. 3 приведены максимальные и минимальные значения, которые показывают минимальное и максимальное значение сорбции для каждого класса давлений ($R = X_{\max} - X_{\min}$). Результат разницы этих значений (Δx), который отражает их интенсивность, приведен в табл. 3.

По результатам расчетов, наибольшее влияние в повышении сорбционных свойств бентонитовой глины в 1 и 2 классе является техногенное воздействие давлением с температурным отжигом в 200 °С и насыщением катионным раствором хлорида железа (FeCl₃), который увеличивает сорбцию на 23% в 1 классе и на 16% во 2 классе. То есть комплексное воздействие механической, термической и химической обработки достигает максимального воздействия на повышение адсорбционных показателей в данном исследовании. Наименьшее воздействие на повышение сорбционных характеристик оказывает катионный раствор хлорида калия (KCl), уменьшая сорбцию на 20% при отжиге в 200 °С и на 22% при отжиге в 400 °С.

Таблица 3. Расчет показателей бентонитовой глины подверженной техногенной нагрузке (давлению, термо- и химической обработке)

Вид техногенной нагрузки	Сорбция							
	Класс 1				Класс 2			
	A, %	\bar{X}^{cp}	$R=x_{max}-x_{min}$	Δx	A, %	\bar{X}^{cp}	$R=x_{max}-x_{min}$	Δx
P	100	185,46	219-160	59	100	211,87	245-192	53
P+t=200°C	118	219,21	248-192	56	115	243,69	258-229	29
P+t=400°C	94	174,45	203-152	51	88	187,38	210-175	35
P+t=200°C+KCl	80	149,83	180-130	50	85	157,15	195-120	75
P+t=200°C+CaCl ₂	90	167,29	203-142	61	96	202,62	230-175	55
P+t=200°C+FeCl ₃	123	227,25	270-150	120	116	243,77	260-230	30
P+t=400°C+KCl	85	159,16	178-147	31	78	165,92	188-142	46
P+t=400°C+CaCl ₂	89	166,83	170-163	7	82	173,30	179-163	16
P+t=400°C+FeCl ₃	94	173,42	178-163	8	83	177,30	180-175	5

*Примечание: P – давление. t – температура обработки.

Выводы

Оценка влияния давления и температурного воздействия на сорбционную активность бентонитовой глины показала, что для образцов двух ступеней термообработки в 200°C и 400°C с повышением давления сорбционная активность увеличивается.

Наблюдается тенденция увеличения показателя сорбции с насыщением катионными растворами для всех исследуемых образцов. Однако следует отметить, что катионный раствор хлорида калия (KCl) снижает сорбционную активность глин по сравнению с не обработанными этим раствором образцами, что свидетельствует о не перспективности использования данного раствора.

Наибольшая адсорбция глин выявлена при обработке ее давлением, температурой в 200°C и хлоридом железа (FeCl₃).

Поддержка

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 20-35-90027.

Funding: The reported study was funded by RFBR, project number 20-35-90027.

Благодарности

Авторы статьи выражают особую благодарность сотрудникам кафедры физической химии и инженерной геологии и охраны недр за оказанную поддержку, помощь и предоставлении необходимого лабораторного оборудования, в особенности доценту кафедры физической химии Медведевой Наталье Александровне.

Библиографический список

Алванян К. А., Андрианов А. В., Селезнева Ю. Н. Закономерности изменения гранулометрического состава бентонитовой глины Зырянского месторождения, активированной давлением. Вестник Пермского Университета. Том 19, №4. 2020. С. 380–387.

Анюхина А. В., Федоров М. В. Изменение содержания воды в глинах при высоких давлениях // Современные технологии в строительстве. Теория и практика. Пермь. 2017. С. 100–101.

Анюхина А. В., Середин В. В., Андрианов А. В., Хлуденева Т. Ю. Влияние термической обработки глин на их адсорбцию по красителю метиленовой голубой // Недропользование. 2(21). 2021. С. 52–57.

Долгов С. И. О связанной и капиллярной воде в почве. Почвоведение. 1943. С. 9–10.

Злочевская Р. И., Королев В. А., Кривошеева З. И., Сергеев Е. М. О природе изменения свойств связанной воды в глинах под действием повышающихся температур и давлений // Вестник Московского Университета Геология 4(3). 1977. С. 80–96.

Злочевская Р. И. Связанная вода в глинистых грунтах. Изд-во Москва. гос. ун-та, Москва. 1969.

Лебедев А. Ф. Почвенные и грунтовые воды. Сельхозгиз, Москва-Ленинград. 1930.

Наседкин В. В., Демиденко К. В., Боева Н. М., Белоусов П. Е., Васильев А. Л. Органоглины. Производство и основные методы использования // Актуальные инновационные исследования: Наука и практика 3(2). 2012.

Осипов В. И., Солоколов В. Н. Глины и их свойства. ГЕОС, Москва. 2013.

Роде А. А. Основы учения о почвенной влаге. Почвенный ин-т им. В. В. Докучаева Россельхозакадемии, Т. 3. М. 2008.

Сергеев Е. М., Голодковская Г. А., Зиангиров Р. С., Осипов В. И., Трофимов В. Т. Грунтоведение. МГУ Москва. 1973.

Середин В. В., Федоров М. В., Лунегов И. В., Медведева Н. А. Закономерности изменения сил адгезии на поверхности частиц каолининовой глины, подверженной сжатию // Инженерная геология. Т. 13, № 3. 2018. С. 8–18.

ГОСТ 21283–93. 1995. Глина бентонитовая для тонкой и строительной керамики. Методы определения показателя адсорбции и емкости катионного обмена. Минск: Изд. Стандартов, 8 с.

Dali Y. L., Belaroui L. S., López-Galindo A., Verdugo-Escamilla C. Synthesis and characterization of zeolite LTA by hydrothermal transformation OF A natural Algerian palygorskite // Applied Clay Science 193 (105690). 2020.

Gu Sh., Kang X., Wang L., Lichtfouse Wang Ch. Clay mineral adsorbents for heavy metal removal from wastewater: a review. Environmental Chemistry Letters, Springer Verlag, 17(2). 2019. pp.629–654.

Kumar N., Zhao C., Klaassen A., Ende Dirk van den, Mugele F., Siretanu I. Characterization of the surface charge distribution on kaolinite particles using high resolution atomic force microscopy. Geochimica et Cosmochimica Acta. 175. 2016. pp. 100–112.

Liu Qi-Xia, Zhou Yi-Ru, Wang M., Zhang Q., Ji T. Adsorption of methylene blue from aqueous

solution onto viscose-based activated carbon fiber felts: Kinetics and equilibrium studies // Adsorption Science & Technology. 0(0). 2019. pp. 1–21.

Mouni L., Belkhiri L., Bollinger J., Bouzaza A. et.al. Removal of Methylene Blue from aqueous solutions by adsorption on Kaolin: Kinetic and equilibrium studied // Applied Clay Science 153. 2018. pp. 38–45.

Osorino-Rubio N. R., Torres-Ochoa J. A., Palma-Tirado M. L. et.al. Study of the dehydroxylation of kaolinite and alunite from a Mexican clay with DRIFTS-MS // Clay Minerals, 51. 2016. pp. 55–68.

Seredin V., Fyodorov M., Lunegov I., Galkin V. Changes in adhesion force on kaolin under pressures // AIP Conference Proceedings 2216 (1), 2020.

Seredin V. V., Khrulev A. S. Variations of temperature in specimens of rocks and geomaterials under failure // Journal of Mining Science 52(4). 2016. pp. 683–688.

Seredin V. V., Leonovich M. F., Krasilnikov P. A. Forecast transformation of dispersed hydrocarbons in soils in the development of oil fields // Oil Industry. 5. 2015. pp. 106–109.

Sruthi P. L., Reddy P. H. P. Swelling and mineralogical characteristics of alkali-transformed kaolinitic clays // Applied Clay Science. 2019. p.105353. 183.

Siteva O. S., Medvedeva N. A., Seredin V. V., Ivanov D. V., Alvanian K. A. Influence of pressure on kaolinite structure in fire-clays of the nizhnevelskoe deposit by IR spectroscopy // Bulletin of the Tomsk Polytechnic University, Geo Assets Engineering, 331(6). 2020. pp. 208–217.

Conversion of Adsorption Properties of Bentonite Clays under Complex Technogenic Impact

A. V. Anyukhina^a, V. V. Seredin^b, A. A. Mironova^b

^aPerm National Research Polytechnic University, 29 Komsomolskiy Ave., 614990, Perm, Russia. E-mail: anuhina.com@gmail.com

^bPerm State University, 15 Bukireva Str., Perm 614990, Russia. E-mail: seredin@nedra.perm.ru

The results of study of the change in the sorption index by chemical, thermal and mechanical treatment of bentonite clay have been obtained. They showed that during the complex processing of samples with mechanical pressure, temperature and cationic solutions, there is a general tendency to an increase in the sorption index. It was found that the greatest effect on the activation of sorption properties is exerted by vertical pressure, heat treatment of samples at 200 °C and saturation with a cationic solution of ferric chloride, which allows us to consider this processing of samples as the most effective for the samples of this study.

Key words: bentonite; adsorption; heat treatment; chemical treatment; cationic solutions; vertical pressure

Alvanyan K.A., Andrianov A.V., Selezneva Yu.N. 2020. Zakonomernosti izmeneniya granulometricheskogo sostava bentonitovoy gliny Zyryanovskogo mestorozhdeniya, aktivirovannoy davleniem [Regularities of changes in the granulometric composition of the bentonite clay of the Zyryanovskoye deposit, activated by pressure]. Vestnik Permskogo Universi-

teta. 19(4):380–387. (in Russian) doi: 10.17072/psu.geol.19.4.380

Anyukhina A.V., Fedorov M.V. 2017. Izmenenie soderzhaniya vody v glinakh pri vysokikh davleniyakh [Change of water content in the clays at high pressures]. Sovremennye tekhnologii v stroitelstve. Teoriya i praktika. Perm, pp. 100–101. (in Russian)

- Anyukhina A.V., Seredin V.V., Andrianov A.V., Khludeneva T.Yu.* 2021. Vliyaniye termicheskoy obrabotki glin na ikh adsorbtsiyu po krasitel'yu metil'novyy goluboy [Influence of thermal treatment of clays on their adsorption by dye methylene blue]. *Nedropolzovanie*. 2(21):52–57. (in Russian)
- Dolgov S.I.* 1943. O svyazannoy i kapillyarnoy vode v pochve [About bound and capillary water in the soil]. In: *Pochvovedenie*, pp. 9–10. (in Russian)
- Zlochevskaya R.I., Korolev V.A., Krivosheeva Z.I., Sergeev E.M.* 1977. O prirode izmeneniya svoystv svyazannoy vody v glinakh pod deystviem povyshayushchikhsya temperatur i davleniy [On the nature of changes in the properties of bound water in clays under the influence of increasing temperatures and pressures]. *Vestnik Moskovskogo Universiteta Geologiya*. 4(3):80–96. (in Russian)
- Zlochevskaya R.I.* 1969. Svyazannaya voda v glinistykh gruntakh [Bound water in clay soils]. *Izdvo Moskva.gos. univ., Moskva*. (in Russian)
- Lebedev A.F.* 1930. Pochvennye i gruntovye vody [Soil and ground water]. *Selkhozgiz, Moskva-Leningrad*. (in Russian)
- Nasedkin V.V., Demidenok K.V., Boeva N.M., Belousov P.E., Vasilev A.L.* 2012. Organogliny. Proizvodstvo i osnovnye metody ispolzovaniya [Organoclays. Production and basic methods of use]. *Aktualnye innovatsionnye issledovaniya: Nauka i praktika* 3(2). (in Russian)
- Osipov V.I., Solokolov V.N.* 2013. Gliny i ikh svoystva [Clays and their properties]. *GEOS, Moskva*. (in Russian)
- Rode A.A.* 2008. Osnovy ucheniya o pochvennoy vlage [Fundamentals of the theory of soil moisture]. *Pochvennyy Inst. im. V. V. Dokuchaeva Ros-selkhozakademii, V. 3. Moskva*. (in Russian)
- Sergeev E.M., Golodkovskaya G.A., Ziangirov R.S., Osipov V.I., Trofimov V.T.* 1973. Gruntovedenie [Soil science]. *MGU Moskva*. (in Russian)
- Seredin V.V., Fedorov M.V., Lunegov I. V., Medvedeva N. A.* 2018. Zakonomernosti izmeneniya sil adgezii na poverkhnosti chastits kaolinitovoy gliny, podverzhannoy szhatiyu [Regularities of changes in adhesion forces on the surface of kaolinite clay particles subjected to compression]. *Inzhenernaya geologiya*. 13(3):8–18. (in Russian)
- GOST 21283–93.* Glina bentonitovaya dlya tonkoy i stroitel'noy keramiki. Metody opredeleniya pokazatelya adsorbtsii i emkosti kationnogo obmena. *Minsk, Izd. standartov, 1995*. p. 8. (in Russian)
- Dali Y.L., Belaroui L.S., López-Galindo A., Verdugo-Escamilla C.* 2020. Synthesis and characterization of zeolite LTA by hydrothermal transformation OF A natural Algerian palygorskite. *Applied Clay Science*. 193 (105690).
- Gu Sh., Kang X., Wang L., Lichtfouse Wang Ch.* 2019. Clay mineral adsorbents for heavy metal removal from wastewater: a review. *Environmental Chemistry Letters, Springer Verlag*, 17(2):629–654.
- Kumar N., Zhao C., Klaassen A., Ende Dirk van den, Mugele F., Siretanu I.* 2016. Characterization of the surface charge distribution on kaolinite particles using high resolution atomic force microscopy. *Geochimica et Cosmochimica Acta*. 175:100–112.
- Liu Qi-Xia, Zhou Yi-Ru, Wang M., Zhang Q., Ji T.* 2019. Adsorption of methylene blue from aqueous solution onto viscose-based activated carbon fiber felts: Kinetics and equilibrium studies. *Adsorption Science & Technology*. 0(0):1–21.
- Mouni L., Belkhiri L., Bollinger J., Bouzaza A. et al.* 2018. Removal of Methylene Blue from aqueous solutions by adsorption on Kaolin: Kinetic and equilibrium studied. *Applied Clay Science* 153:38–45.
- Osorino-Rubio N. R., Torres-Ochoa J. A., Palma-Tirado M.L. et al.* 2016. Study of the dehydroxylation of kaolinite and alunite from a Mexican clay with DRIFTS-MS. *Clay Minerals*, 51:55–68.
- Seredin V., Fyodorov M., Lunegov I., Galkin V.* 2020. Changes in adhesion force on kaolin under pressures. *AIP Conference Proceedings* 2216 (1).
- Seredin V.V., Khrulev A.S.* 2016. Variations of temperature in specimens of rocks and geomaterials under failure. *Journal of Mining Science* 52(4):683–688.
- Seredin V.V., Leonovich M.F., Krasilnikov P.A.* 2015. Forecast transformation of dispersed hydrocarbons in soils in the development of oil fields. *Oil Industry*. 5:106–109.
- Sruthi P.L., Reddy P.H.P.* 2019. Swelling and mineralogical characteristics of alkali-transformed kaolinitic clays. *Applied Clay Science*. p. 105353. 183.
- Siteva O.S., Medvedeva N.A., Seredin V.V., Ivanov D.V., Alvanian K.A.* 2020. Influence of pressure on kaolinite structure in fire-clays of the nizhneuvelskoe deposit by IR spectroscopy. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University, Geo Assets Engineering*, 331(6):208–217.