

УДК 628.16

DOI 10.52928/2070-1683-2025-41-2-23-30

**ГИДРОХИМИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ УДАЛЕНИЯ ЖЕЛЕЗА И МАРГАНЦА
НА КВАРЦЕВОМ ПЕСКЕ И СОРБЕНТЕ АС****Е.С. ВЕЛЮГО****ORCID: <https://orcid.org/0009-0001-6165-1929>****канд. техн. наук, доц. А.А. ЕРМАК****ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4398-1796>****канд. техн. наук, доц. В.Д. ЮЩЕНКО****ORCID: <https://orcid.org/0009-0009-9485-3760>****(Полоцкий государственный университет имени Евфросинии Полоцкой)**

В статье описывается сравнительный анализ структурных и энергетических параметров свежего и бывшего в эксплуатации песка и сорбента марки АС методом адсорбции паров воды с использованием порометра BELSORP MAX. Обработка изотерм адсорбции-десорбции выполнена в программном комплексе BELMaster MicrotracBEL Corp с расчетом удельной поверхности, суммарного объема, среднего размера пор и энергии адсорбции паров воды по методам BET, Ленгмюра и Дубинина-Астахова (DA). Наблюдается увеличение удельной поверхности и пористости бывшего в эксплуатации песка и сорбента марки АС, что свидетельствует о структурных изменениях в процессе их эксплуатации: увеличении удельной поверхности и пористости. Полученные результаты позволяют сделать вывод о возможности повторного использования отработанного песка и сорбента марки АС после регенерации, а также о необходимости учета изменений их свойств при проектировании систем очистки.

Ключевые слова: природные воды, качество воды, песчаная загрузка, сорбент АС, гидрохимическая модель, порометр.

Введение. Важным элементом фильтров очистки природной воды является фильтрующая загрузка, материалы которой должны обеспечивать стабильность воды, эффективное задержание и удержание загрязнений в своей среде, а также исключать наличие токсичных элементов и веществ, способных ухудшить качество фильтрата. Кроме того, нужно, чтобы эти материалы обладали высокой механической прочностью и химической стойкостью к измельчению и истиранию в процессе регенерационной промывки обратным током воды. Следует учитывать доступность такого материала и его стоимость. В практике водоподготовки, особенно при малых объемах водопотребления с любым концентрационным исходным составом, в качестве загрузки напорных фильтров широко используют песок и группу сорбентов (например, минеральный сорбционный материал марки АС), имеющих в своем составе алюмосиликатную группу [1]. К адсорбентам предъявляется ряд дополнительных требований: высокая удельная поверхность, объём и распределение пор по размерам, сорбционная емкость, термостабильность и пр.¹.

Основная часть. Цель данного исследования заключается в разработке гидрохимической модели процессов удаления железа, марганца из природной воды на указанных фильтрующих материалах. Данная модель может быть использована для изобретения экологически безопасных и эффективных технологий адсорбционной очистки воды. Для этого были определены и проанализированы изменения в пористой структуре и поверхностных свойствах песка и сорбента марки АС до и после их эксплуатации в промышленном фильтре обезжелезивания, что критически важно для понимания механизмов деградации и регенерации этих материалов.

Проведенные исследования влияния степени аэрации воды на удаление железа и марганца при обработке природной воды в напорных фильтрах обезжелезивания с использованием в качестве адсорбентов песка и сорбента марки АС [2; 3] показали их высокую адсорбционную ёмкость по отношению к этим элементам. В то же время эффективность снижения содержания в воде аммонийных соединений и перманганатной окисляемости была очень незначительна и составляла всего 3–10% (рисунок 1). В работе [4] было доказано отрицательное влияние аммонийного азота на удаление железа и марганца из подземной воды. В связи с этим необходимо рассмотреть химические процессы, протекающие при очистке воды, в том числе и при частичном снижении (разложении) аммонийного азота.

Исследования были проведены в производственных условиях на природной воде сложного состава, характеризующейся высоким уровнем загрязнений, включая концентрации железа выше 4,5 мг/л, аммонийного азота, превышающие 3,0 мг/л, и перманганатную окисляемость более 5 мгО₂/л. Такие параметры свидетельствуют о значительной загрязнённости воды и усложняют её эффективную очистку до установленных нормативных требований.

Как видно из рисунка 1, при очистке подземной воды, содержащей примеси сложного состава, с увеличением воздушно-водяного отношения концентрация общего железа в воде снижается. Кроме того, применение сорбента марки АС увеличивает эффективность удаления этого загрязнителя. Однако даже при степени насыщения воды кислородом воздуха 5 к 1 с последующей фильтрацией на фильтрах с использованием сорбента марки АС не было получено в фильтрате устойчивых нормативных концентраций по рассматриваемым примесям. И все же очевидна разница в действии выбранных материалов по отношению к данным загрязнителям.

¹ Научные исследования, разработка технологии и производство адсорбентов и фильтрующих средств для очистки и доочистки воды [Электронный ресурс] // Сорбент АС. – URL: <https://alsis-ur.ru/sorbent-as/> (дата обращения: 25.05.2025).

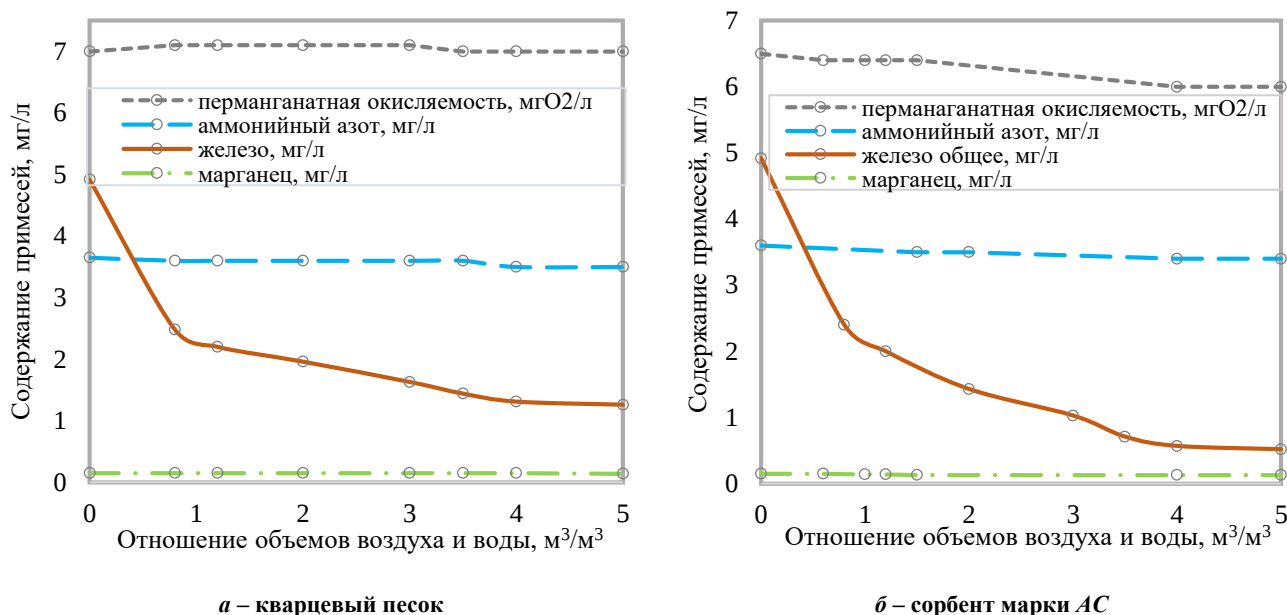


Рисунок 1. – Снижение концентраций загрязняющих веществ на кварцевом песке и сорбенте АС при изменении степени аэрации подземной воды

Методология исследований. Наиболее распространенным способом описания адсорбционных явлений являются изотермы адсорбции, которые позволяют установить особенности и механизм адсорбции на основе формы изотерм. В качестве объекта исследования с целью оценки адсорбционных свойств и характеристик пористой структуры были выбраны четыре образца: кварцевый песок (свежий и бывший в эксплуатации) и сорбент АС (свежий и бывший в эксплуатации). Бывшие в эксплуатации адсорбенты взяты из производственных фильтров станций обезжелезивания Витебской области.

Кварцевый песок считается инертным материалом с размером частиц 0,8–1,2 мм и насыпной плотностью 0,68–0,72 г/см³. Химический состав песка следующий (в % масс.): SiO₂ – 99,2%, Al₂O₃ – 0,67%, Fe₂O₃ – 0,075%, MgO – 0,025%, остальное – менее 0,03%². Производителем сорбента марки АС является ООО «АЛСИС», г. Екатеринбург. Данный материал имеет размер частиц 0,7–1,4 мм. Его химический состав: SiO₂ – 78%, Al₂O₃ – 7,0%, Fe₂O₃ – 5,0%, MgO – 0,5%, остальное – менее 9,5%³.

Определение удельной поверхности и объема пор проводилось путем анализа изотерм адсорбции, полученных с использованием порометра BELSORP MAX, принцип действия которого основан на адсорбции газов и паров на внешней и внутренней поверхностях (в порах) исследуемых образцов. Изотерма адсорбции представляет собой зависимость количества адсорбированного вещества (величины адсорбции) от парциального давления этого вещества в газовой фазе при постоянной температуре. В качестве адсорбтива (вещества, молекулы которого могут адсорбироваться на поверхности адсорбента) применялась вода. Анализ данных был выполнен с использованием аналитического программного обеспечения BELMaster MicrotracBEL Corp^{4,5}.

Исследуемые образцы перед проведением измерений подвергались предварительной подготовке и дегазации при температуре 160°C в течение часа под вакуумом с последующей продувкой гелием.

На основании обработки полученных изотерм адсорбции и десорбции с использованием аналитического программного обеспечения были рассчитаны следующие характеристики⁶:

- удельная поверхность по методам Лэнгмюра и БЭТ (Брунауэра, Эммета и Теллера);
- удельный объем пор по методам Лэнгмюра и БЭТ (Брунауэра, Эммета и Теллера);
- средний размер (диаметр, ширина) пор по методу БЭТ.

Экспериментальная часть. Полученные с помощью порометра BELSORP MAX изотермы адсорбции/десорбции исследуемых образцов (свежего и бывшего в эксплуатации песка и сорбента марки АС) представлены на рисунке 2.

² Аквацит [Электронный ресурс] / Кварцевый песок и гравий. – URL: <https://aquatreat.by/komplektuyushhie/filtruyushhie-sredy/kvarcevyy-pesok-i-gravij/> (дата обращения: 25.05.2025).

³ См. сноску 1.

⁴ Высоточный прибор для измерения адсорбции газа/пара. Руководство по эксплуатации. – MicrotracBEL Corp. BELSORP MAX, 2020 – 180 с.

⁵ BELMaster. Analysis Software. User's Manual. – MicrotracBEL Corp., 2020. – 227 p.

⁶ См. сноску 5.

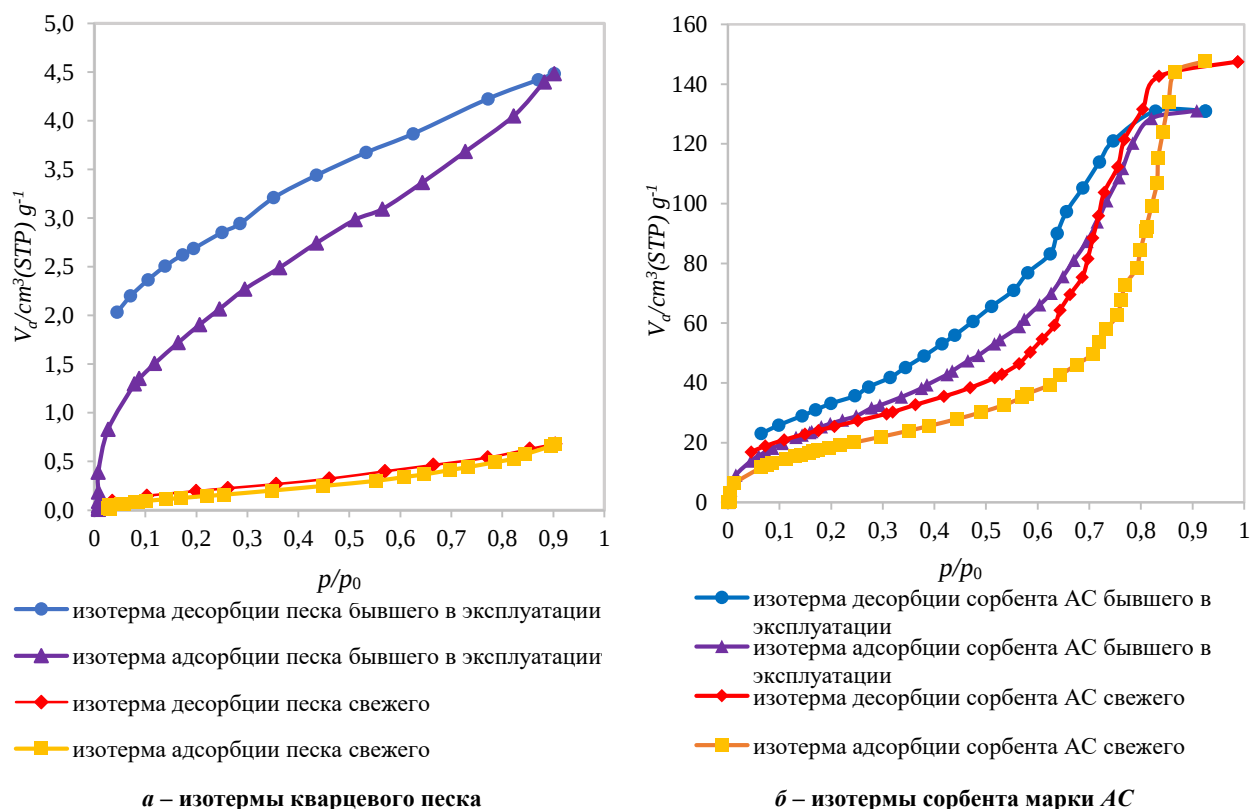


Рисунок 2. – Изотермы адсорбции/десорбции исследуемых образцов на адсорбтиве вода H_2O ($p_0 = 2,317$ кПа, 20°C)

Анализ полученных изотерм адсорбции/десорбции (восходящие ветви в области средних и высоких относительных давлений ($p/p_0 > 0,4$) для обоих образцов кварцевого песка (см. рисунок 2, а) позволяет отнести их к типу IV согласно классификации IUPAC (International Union of Pure and Applied Chemistry), что характерно для мезопористых материалов (диаметр пор 2–50 нм). Изотермы данного типа отражают протекание процесса капиллярной конденсации в мезопорах и макропорах, а выгнутый характер начального участка указывает на сильное взаимодействие адсорбат-адсорбента. Явление капиллярной конденсации связано с тем, что пары адсорбируемого газа конденсируются в порах твёрдого вещества при давлениях ниже давления насыщенного пара⁷.

Появление петли гистерезиса на изотерме адсорбции-десорбции связано с тем, что заполнение пор и последующая десорбция протекает по разному механизму, в результате чего изотерма десорбции оказывается сдвинутой в область меньших относительных давлений по отношению к изотерме адсорбции. Для свежего песка петля гистерезиса узкая, почти вертикальная в области высоких p/p_0 (0,8–1,0), которая соответствует типу Н4. Закрытие петли происходит при $p/p_0 \approx 0,4$ (эффект капиллярного испарения). Это указывает на наличие щелевидных пор (slit-shaped pores). У песка, взятого из эксплуатируемого фильтра, петля широкая без четкого плато при $p/p_0 \rightarrow 1$, с резким спадом десорбционной ветви при $p/p_0 \approx 0,45$ (НЗ-тип). Данный вид изотерм характерен для материалов с неоднородной структурой пор (трещины, конические или чернильницеобразные поры). Это объясняется физическим изменением зерен в процессе эксплуатации песка: у свежего песка гистерезис вызван контактными порами между частицами, а у использованного – капиллярной конденсацией в щелевидных порах, образовавшихся при эксплуатации.

Таким образом, расширение гистерезиса является диагностическим признаком необратимых текстурных изменений при эксплуатации фильтрующей загрузки. Формирование пор типа «чернильница» (ink-bottle pores) объясняется механическим разрушением зерен под нагрузкой и химической модификацией поверхности. Вероятно, это происходит из-за накопления оксидов железа на поверхности песка из фильтруемой воды, что приводит к росту мезопористости в использованном песке. Эффект закрытия петли при $p/p_0 \approx 0,4$ (свежий песок) связан с капиллярным испарением из мезопор критического диаметра (теория Кельвина), тогда как для использованного песка смещение точки закрытия отражает уменьшение среднего диаметра пор (комплексная система широких и узких пор, включая «чернильницы»).

Полученный вид изотерм адсорбции/десорбции для обоих образцов сорбента АС (см. рисунок 2, б) относится по классификации IUPAC (International Union of Pure and Applied Chemistry) к IV типу и имеет петлю гистерезиса, нижнюю ветвь которой получают, измеряя адсорбцию при последовательном добавлении газа в систему (изотерма адсорбции), а верхнюю ветвь – при последовательном его убавлении (изотерма десорбции). Представленная петля типа НЗ для обоих образцов определяется задержкой конденсации и свидетельствует о том, что адсорбент имеет щелевидные поры. Однако для бывшего в эксплуатации сорбента марки АС гистерезисная петля существенно

⁷ См. сноску 5.

шире, что указывает на увеличение доли мезопор, появление большего количества «горлышек» в пористой структуре и усиление капиллярной конденсации.

Результаты и обсуждения. На основании обработки полученных изотерм адсорбции и десорбции с использованием аналитического программного обеспечения BELMaster MicrotracBEL Corp были рассчитаны показатели исследуемых образцов, представленные в таблице 1.

Таблица 1. – Результаты анализа исследуемых образцов

Показатель	Кварцевый песок		Сорбент АС	
	свежий	бывший в эксплуатации	свежий	бывший в эксплуатации
Удельная поверхность по методу BET, м ² /г	0,49503	5,5487	57,422	87,735
Суммарный объем пор по методу BET, см ³ /г (при стандартных условиях)	0,1474	1,6522	17,098	26,124
Средний диаметр пор по методу BET, нм	4,45	2,61	8,47	4,82
Коэффициент C (энергетическая константа)	11,44	35	24,829	19,412
Удельная поверхность по методу Ленгмюра, м ² /г	1,0337	22,002	111,15	129,5
Суммарный объем пор по методу Ленгмюра, см ³ /г (при стандартных условиях)	1,8981	6,5513	33,096	38,561
Коэффициент B	1,8981	0,8145	3,0103	4,5721
Энергия адсорбции по методу Дубинина-Астахова (DA), кДж/моль [5]	1,4348	5,0491	5,1495	5,3821

Результаты анализа кварцевого песка показывают (см. таблицу 1) значительные различия между свежим и бывшим в эксплуатации материалом. Удельная поверхность по методу BET для свежего песка составила 0,495 м²/г, что свидетельствует о низкой пористости данного материала. В то же время, у бывшего в эксплуатации песка этот показатель увеличился до 5,549 м²/г, что указывает на развитие пористой структуры при фильтрации. Это подтверждается и увеличением суммарного объема пор с 0,1474 до 1,6522 см³/г.

Средний диаметр пор (метод BET) снизился с 4,45 нм до 2,61 нм, что может быть связано с образованием более мелких пор в процессе использования материала. Коэффициент C вырос с 11,44 до 35, что отражает увеличение энергии адсорбционного взаимодействия в бывшем в эксплуатации песке и изменение потенциала адсорбции.

Дополнительно были получены показатели по методу Ленгмюра: удельная поверхность для свежего песка равна 1,03 м²/г при суммарном объеме пор 1,898 см³/г; у бывшего в эксплуатации песка – 22,00 м²/г и 6,55 см³/г соответственно. Коэффициент B снизился с 1,898 до 0,8145 при переходе к использованному материалу. Энергия адсорбции по методу DA увеличилась с 1,43 кДж/моль у свежего до 5,05 кДж/моль у бывшего в эксплуатации образца.

Данные показатели свидетельствуют о существенных изменениях структурных характеристик кварцевого песка после эксплуатации: увеличение удельной поверхности и объема пор говорит о развитии микропористой неоднородной структуры за счет возможных дефектов или разрушений поверхности. Рост энергии адсорбции у бывшего в эксплуатации песка может быть обусловлен изменениями поверхностных свойств и наличием новых адсорбционных центров. С данными значениями согласуется рост гистерезиса и смещение точки закрытия петли на рисунке 3.

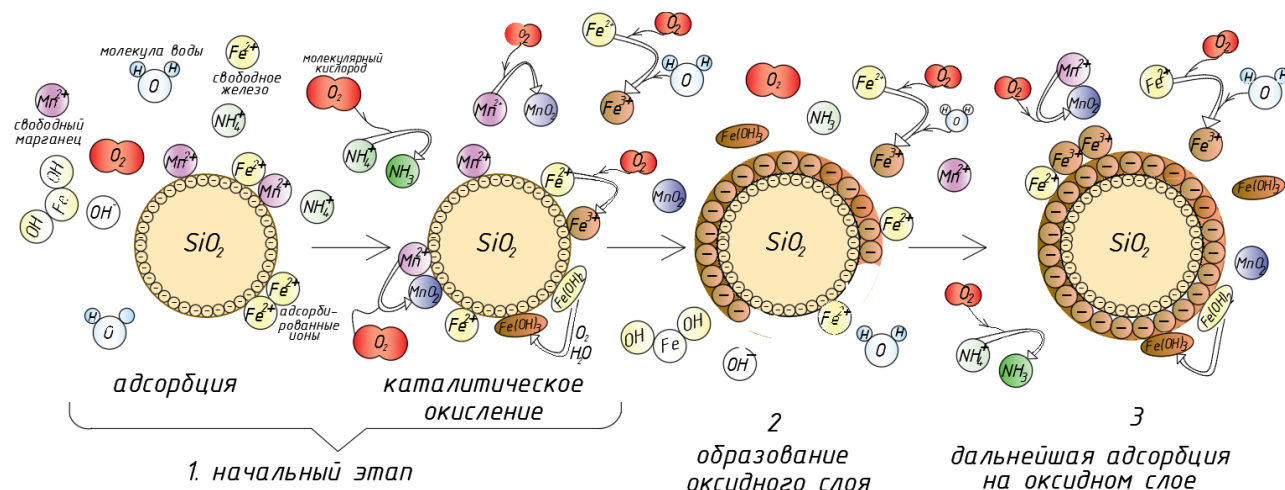


Рисунок 3. – Гидрохимическая модель процессов удаления железа и марганца на кварцевом песке в напорном скором фильтре

Таким образом, результаты подтверждают значительную трансформацию структурных и энергетических параметров кварцевого песка в процессе его использования. Эти результаты могут быть полезны для описания гидрохимической модели процессов обезжелезивания в ходе эксплуатации фильтров с песчаной загрузкой.

Анализ полученных результатов и теоретическое изучение вопросов обезжелезивания на фильтрах с песчаной загрузкой⁸ [6; 7] позволяет получить гидрохимическую модель процессов удаления железа и марганца на песчаной загрузке (см. рисунок 3).

1. Начальный этап (фаза свежего песка) включает:

– адсорбцию железа Fe^{2+} и молекулярного кислорода O_2 на поверхности зерен песчаной загрузки. Вначале процесса обезжелезивания адсорбция осуществляется под действием поверхностных Ван-дер-Ваальсовых сил притяжения или сил притяжения Кулона (физическая адсорбция), возникающих вследствие противоположного заряда адсорбата и адсорбента [8] (см. рисунок 3). Стоит отметить, что с увеличением содержания кислорода сорбционная способность песка, зерна которого имеют слабоотрицательный заряженный электрокинетический потенциал, увеличивается по отношению к положительно заряженным ионам двухвалентного железа.

– каталитическое окисление адсорбированных ионов железа и их гидролиз на поверхности загрузки фильтра с образованием гидроокиси железа. Дальнейшая сорбция ионов железа (II) протекает одновременно на оставшейся еще свободной поверхности зерен песка и на поверхности гидроокиси железа.

2. Через некоторое время происходит сорбция окисленного железа, а электрокинетический потенциал зерен среды уменьшается, адсорбционные свойства указанной поверхности снижаются. Последующее каталитическое окисление сорбированного железа и марганца в присутствии растворенного в воде кислорода приводит к образованию нового оксидного слоя (адсорбционно-каталитической пленки). Осевшие на поверхности зерен гранулы соединений железа постепенно сливаются в крупные скопления и покрывают всю загрузку. Вначале лишь часть мицелл железа (II) претерпевает окисление до железа (III), однако по мере прохождения новых порций исходной воды процесс окисления распространяется на всё железо внутри загрузки, которое при данных условиях способно окисляться. Как показали лабораторные исследования⁹ [7], данный слой в начальных стадиях образования состоит из аморфных гидроксидов железа ($\text{Fe}(\text{OH})_3$) с возможным присутствием других оксидов двухвалентного и трехвалентного железа (FeO , Fe_2O_3 , Fe_3O_4 , $\text{Fe}(\text{OH})_2$ и др.), но со временем и при длительном контакте с воздухом эти гидроксиды кристаллизуются в более стабильные формы гематита ($\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot x\text{H}_2\text{O}$) или лейкоксенита ($\text{FeO}(\text{OH})$).

3. Оксидный слой (продукт, образованный в результате сорбции, гидролиза и окисления ионов двухвалентного железа) обладает значительно большей сорбционной способностью, чем поверхность свежей загрузки, кроме того, у него высокая величина удельной поверхности, а также он характеризуется наличием больших количеств связанной воды, что делает ее эффективным адсорбентом губчатой структуры [6]. На данный факт указывают полученные изотермы (см. рисунок 3) и результаты анализа исследуемых образцов (см. таблицу 1). Увеличение энергии адсорбционного взаимодействия по отношению ионов железа (II) в бывшем в эксплуатации песке и изменение потенциала адсорбции согласуется с ростом коэффициента C (см. таблицу 1). На данном этапе извлечение из воды ионов железа (II) и марганца (II) достигается адсорбцией на оставшейся свободной поверхности зерен кварцевого песка и на поверхности оксидного слоя.

4. Образовавшийся слой интенсифицирует процессы дальнейшей адсорбции и окисления железа (II) и марганца (II) и облегчает процесс очистки.

Для свежего сорбента марки АС анализ результатов исследований (см. таблицу 1) текстурных (пористых) характеристик (метод BET) показывает, что его удельная поверхность составляет $57,422 \text{ м}^2/\text{г}$, в то время как у бывшего в эксплуатации адсорбента этот показатель выше на $52,8\% - 87,735 \text{ м}^2/\text{г}$. Это свидетельствует о том, что бывший в эксплуатации сорбент обладает более развитой поверхностью, что связано с изменениями в его структуре.

Суммарный объем пор бывшего в эксплуатации сорбента увеличился с $17,098$ до $26,124 \text{ см}^3/\text{г}$ ($+52,9\%$), что согласуется с ростом удельной поверхности и указывает на более выраженную пористую структуру материала. Это может способствовать улучшению его адсорбционных свойств.

Средний диаметр пор у свежего сорбента составляет $8,47 \text{ нм}$, что указывает на то, что свежий сорбент марки АС состоит в основном из мезопор, в то время как у бывшего в эксплуатации сорбента он значительно меньше – $4,82 \text{ нм}$. Это уменьшение диаметра пор может быть связано с процессами засорения или изменениями в морфологии материала во время его эксплуатации.

Энергия адсорбции (метод Дубинина-Астахова, DA) незначительно возросла с $5,1495$ до $5,3821 \text{ кДж/моль}$ ($+4,5\%$), что обеспечивает более сильное взаимодействие с молекулами адсорбатов.

Понижение значения коэффициента C с $24,829$ до $19,412$ ($-21,8\%$) указывает на снижение энергии взаимодействия между адсорбатом и адсорбентом, что отражает снижение энергии адсорбционного взаимодействия поверхности с адсорбатом из-за изменения химического состава поверхности бывшего в эксплуатации сорбента (например, накопления полярных групп).

По данным метода Ленгмюра удельная поверхность свежего сорбента составляет $111,15 \text{ м}^2/\text{г}$, а у бывшего в эксплуатации – $129,5 \text{ м}^2/\text{г}$, что на $16,5\%$ выше. Это подтверждает тенденцию к увеличению адсорбирующей способности отработанного материала. Суммарный объем пор по методу Ленгмюра для свежего сорбента увеличился с $33,096 \text{ см}^3/\text{г}$ до $38,561 \text{ см}^3/\text{г}$, что также подтверждает более высокую пористость последнего образца.

⁸ Saleh A. Biologisk avskiljning av järn och mangan vid dricksvattenproduktion: Civilingenjör, teknisk kemi: 12.00.15. – 2021. – 48 с. URL: <https://urn.kb.se/resolve?urn=urn:nbn:se:miun:diva-41495>.

⁹ См. сноску 4.

Коэффициент B вырос с 3,0103 до 4,5721 (+51,9%), что указывает на более высокую степень насыщения активных центров на поверхности бывшего в эксплуатации сорбента.

Полученные результаты подтверждают предположение о том, что в процессе эксплуатации структура и функциональность сорбента марки АС изменяются. Это важно учитывать при исследовании механизмов очистки природной воды и разработке гидрохимической модели процессов удаления загрязняющих веществ.

Процесс обработки воды на сорбенте марки АС состоит из следующих этапов (рисунок 4).

1. Начальный этап (фаза свежего сорбента) включает:

– адсорбцию. Хотя алюмосиликатные материалы обладают большей поверхностью и более высокой адсорбционной способностью, чем кварцевый песок, в начале процесса адсорбция железа и марганца осуществляется аналогично под действием поверхностных Ван-дер-Ваальсовых сил притяжения или сил притяжения Кулона (физическая адсорбция), возникающих вследствие противоположного заряда адсорбата и адсорбента. Введение же кислорода воздуха в фильтр с сорбентом марки АС интенсифицирует процесс адсорбции на поверхности материала благодаря его свойствам, которые играют ключевую роль в окислении растворённых форм железа ($\text{Fe}^{2+} \rightarrow \text{Fe}^{3+}$) и марганца ($\text{Mn}^{2+} \rightarrow \text{Mn}^{4+}$) в сравнении с кварцевым песком;

– каталитическое окисление. Алюмосиликаты служат катализаторами для окисления металлов в растворе, стимулируя и увеличивая скорость реакции окисления за счет активации кислорода, находящегося в воде. Окисленные железо и марганец осаждаются на поверхности сорбента, что дополнительно увеличивает эффективность их удаления. Каталитически активные компоненты входят в структуру гранулы сорбента равномерно, что обеспечивает его эффективную работу даже при разломе гранулы.

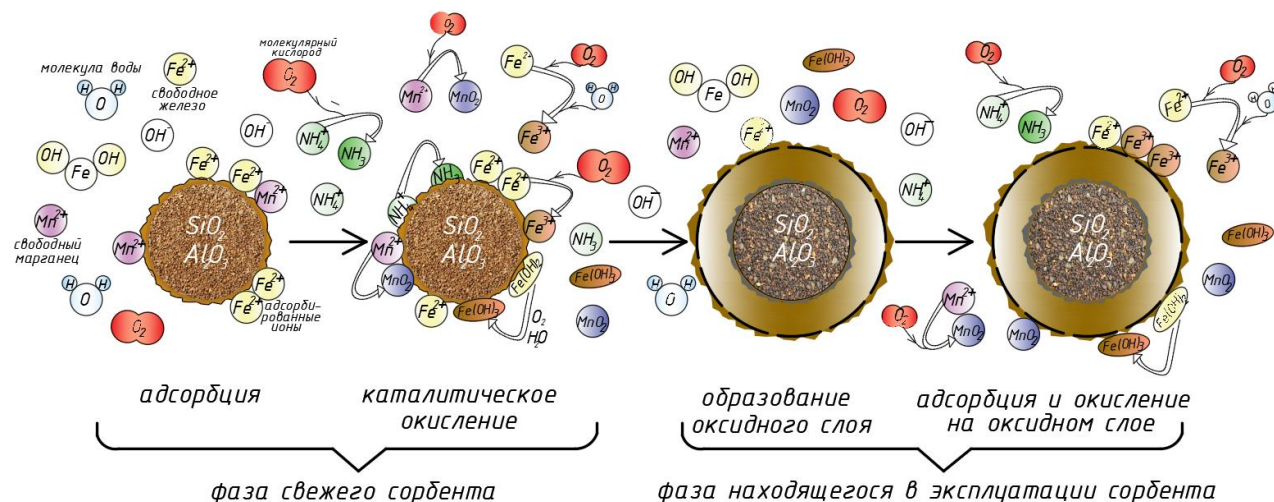


Рисунок 4. – Гидрохимическая модель процессов удаления железа и марганца на сорбенте АС в скором фильтре

2. Второй этап (фаза работающего сорбента АС) включает:

– образование оксидного слоя. По мере продолжения работы фильтра свежий сорбент, как было описано выше, начинает терять свои адсорбирующие свойства из-за насыщения его активных центров соединениями ($\text{Fe}^{2+} \rightarrow \text{Fe}^{3+}$, $\text{Mn}^{2+} \rightarrow \text{Mn}^{4+}$), вследствие чего формируются барьеры и изменения в структуре этого материала. Можно предположить, что в мезопорах и макропорах свежего сорбента марки АС происходит осаждение оксидов двухвалентного и трехвалентного железа FeO , Fe(OH)_2 , Fe_2O_3 , марганца MnO_2 и магнетита Fe_3O_4 , образовавшихся в результате аэрации и обезжелезивания [6], что приводит к увеличению удельной поверхности. Полученные данные объясняют возможное повышение адсорбционной емкости бывшего в эксплуатации сорбента для малых молекул из-за уменьшения размера пор;

– адсорбцию и окисление оксидного слоя. В дальнейшем соединения железа и марганца адсорбируются слабее, но окисление ионов Fe^{2+} может ускоряться за счёт накопленных на поверхности его оксидов (стадия автокатализа). Насыщение активных центров сорбента также значительно уменьшает ионообменную ёмкость материала по отношению к ионам аммония NH_4^+ . Незначительное снижение аммония происходит за счет его перехода в газообразное состояние NH_3 , который вымывается из обрабатываемой воды. Поэтому очистка от аммонийных соединений малоэффективна.

3. Последняя фаза для данных материалов называется фазой регенерации отработанного песка и сорбента марки АС. Дальнейшее обезжелезивание воды на песке и сорбенте марки АС сопровождается, с одной стороны, деградацией образовавшегося оксидного слоя за счет снижения адгезионных сил между примесями и поверхностью зерен фильтрующего материала, что приводит к отделению и выносу частиц железа (III) из фильтра и ухудшению качества получаемого фильтрата, а с другой стороны, увеличением потерь напора за счет значительного количества воды, содержащейся в рыхлых и нестабильных его агрегатах. Таким образом, при сложном составе

микропримесей, содержащихся в воде, межпоровое пространство достаточно быстро засоряется железистыми и марганцевыми соединениями. В связи с этим необходимо проводить регенерацию данных материалов, например, обратной промывкой чистой водой. Время между промывками (фильтроцикл) должен устанавливаться при эксплуатации фильтров до максимальной величины роста потерь напора, но для обезжелезивания воды чаще по ухудшению качества фильтрата.

Заключение. Полученные результаты подтверждают гипотезу о структурной модификации кварцевого песка и сорбента марки АС в процессе эксплуатации, что открывает перспективы для его использования после регенерации.

На основании проведенного анализа можно сделать вывод о том, что бывшие в эксплуатации кварцевый песок и сорбент марки АС демонстрируют улучшенные характеристики по сравнению со свежими образцами во многих аспектах. Увеличенная удельная поверхность и суммарный объем пор свидетельствуют об их высокой адсорбирующей способности и развитой микропористой структуре. Однако уменьшение среднего диаметра пор может указывать на изменения в механизмах взаимодействия между адсорбатом и адсорбентом после эксплуатации.

Изучение свойств фильтрующих материалов и составление гидрохимической модели поведения загрязняющих веществ в процессах очистки воды указывают на доказанную ранее эффективную очистку от железа и марганца. Однако данные виды материалов не способны дать положительный результат по обработке воды с несколькими примесями в больших концентрациях, присутствующими в природной воде, преимущественно органического и аммонийного происхождения. Поэтому очевидно предположить, что данные фильтрующие материалы нужно рассматривать в качестве первой ступени очистки природной воды сложного состава, что является предпосылкой для изучения возможных альтернативных фильтрующих загрузок и изменения технологических схем, например, применяя двухступенчатое фильтрование.

Данные результаты подчеркивают важность изучения свойств фильтрующих материалов с целью их использования в процессах водоподготовки и разработки эффективных методов регенерации адсорбентов для повышения их эксплуатационных характеристик в области очистки природных вод.

ЛИТЕРАТУРА

1. Велюго Е.С. Анализ фильтрующих материалов для обработки подземных вод сложного состава // Устойчивое развитие: региональные аспекты: сб. ст. XI Междунар. науч.-практ. конф. молодых ученых / г. Брест (24–26 апр. 2019 г.). – С. 211–213. URL: <https://rep.bstu.by/discoverBasheer>.
2. Yushchenko V., Velyugo E., Romanovski V. Influence of ammonium nitrogen on the treatment efficiency of underground water at iron removal stations // *Groundwater for Sustainable Development*. – 2023. – Vol. 22. DOI: 10.1016/j.gsd.2023.100943.
3. Ющенко В.Д., Велюго Е.С., Козицин Т.В. Влияние степени аэрации воды на удаление марганца при обработке воды сложного состава в напорных фильтрах с различными нагрузками // Вестн. Полоц. гос. ун-та. Сер. Ф, Стр-во. Приклад. науки. – 2024. – № 4(39). – С. 58–62. DOI: 10.52928/2070-1683-2024-39-4-58-62.
4. Велюго Е.С. Влияние аммонийного азота на состав и очистку подземных вод // Актуальные вопросы эффективного и комплексного использования водных ресурсов: сб. материалов междунар. науч.-практ. конф., приуроченной ко Всемирному дню водных ресурсов / г. Минск (22–24 марта 2023 г.) / М-во природ. ресурсов и охраны окружающей среды, РУП «ЦНИИКИВР»; отв. ред. О.В. Ковзунова. – Минск: Нац. библ. Беларуси, 2023. – С. 96–100.
5. Дубинин М.М. Адсорбция и пористость. – М.: ВАНХЗ, 1972. – 128 с.
6. Николадзе Г.И. Обезжелезивание природных и оборотных вод. – М.: Стройиздат, 1978. – 161 с.
7. Sharma S., Petrusevskioch B., Schippers J.C. Biological iron removal from groundwater: a review // *Journal of Water Supply: Research and Technology-Aqua*. – 2005. – № 54(4). – С. 239–247. DOI: 10.2166/aqua.2005.0022.
8. Лукнер Л., Шестаков В.М. Моделирование миграции подземных вод. – М.: Недра, 1986. – 208 с.

REFERENCES

1. Velyugo, E.S. Analysis of filtrate materials for processing complex underground waters // *Proceedings of the XI International Scientific and Practical Conference of Young Scientists «Sustainable Development: Regional Aspects»*. – Brest, 2019. – P. 211–213. URL: <https://rep.bstu.by/discoverBasheer>.
2. Yushchenko, V. Influence of ammonium nitrogen on the treatment efficiency of underground water at iron removal stations / V. Yushchenko, E. Velyugo, V. Romanovski // *Groundwater for Sustainable Development*. – 2023. DOI: 10.1016/j.gsd.2023.100943.
3. Effect of water aerating rates on manganese removal during processing of complex water in pressure filters with various loads / V.D. Yushchenko, E.S. Velyugo, T.V. Kozitsin // *Bulletin of Polotsk State University. Series F. Construction. Application sciences*. – 2024. – № 4(39). – P. 58–62. DOI: 10.52928/2070-1683-2024-39-4-58-62.
4. Velyugo, E.S. Influence of ammonium nitrate on the composition and purification of underground waters / E.S. Velyugo // *Collection of materials from the international scientific-practical conference «Current issues of effective and comprehensive use of water resources»*, dedicated to the global daily water resources, March 22–24, 2023, Minsk. – Ministry of Natural Resources and Environmental Protection, RUP «TsNIKIIVR»; [edited by O. V. Kovzunova]. – Minsk: National Library of Belarus, 2023. – P. 96–100.
5. Dubinin, M.M. *Adsorption and resistance* / M.M. Dubinin. – M.: VAKhZ, 1972. – 128 p.
6. Nikoladze, G.I. *Reduction of natural and recycled waters* / G.I. Nikoladze. – M.: Stroizdat, 1978. – 161 p.
7. Sharma, S. Biological iron removal from groundwater: a review / S. Sharma, B. Petrusevskioch, J.C. Schippers // *Journal of Water Supply: Research and Technology-Aqua*. – 2005. – № 54(4). – P. 239–247. DOI: 10.2166/aqua.2005.0022.
8. Lukner, L. *Modeling of underground water migrations* / L. Lukner, V.M. Shestakov – M.: Nedra, 1986. – 208 p.

Поступила 11.06.2025

HYDROCHEMICAL MODELS OF IRON AND MANGANESE REMOVAL ON QUARTZ SAND AND SORBENT AC

E. VELYUGO, A. YERMAK, V. YUSHCHENKO
(*Euphrosyne Polotskaya State University of Polotsk*)

The article describes a comparative analysis of the structural and energy parameters of fresh and used sand and AC grade sorbent by the water vapor adsorption method using a BELSORP MAX porometer. The processing of adsorption-desorption isotherms was performed in the BELMaster MicrotracBEL Corp software package with the calculation of the specific surface area, total volume, average pore size and adsorption energy of water vapor using the BET, Langmuir and Dubinin-Astakhov (DA) methods. An increase in the specific surface area and porosity of the used sand and sorbent of the AC brand is observed, which indicates structural changes during their operation: an increase in the specific surface area and porosity. The obtained results allow us to draw a conclusion about the possibility of reusing spent sand and AC grade sorbent after regeneration, as well as the need to take into account changes in their properties when designing treatment systems.

Keywords: *natural waters, water quality, sand loading, AC sorbent, hydrochemical model, porometer.*