

## ИССЛЕДОВАНИЕ СВОЙСТВ АКТИВНОЙ УГОЛЬНОЙ ТКАНИ И ХЕМОСОРБЕНТА НА ЕЕ ОСНОВЕ ДЛЯ ПОГЛОЩЕНИЯ АММИАКА

Е.А. Фарберова, Е.В. Чашчина, С.А. Смирнов, Е.А. Першин, Н.Б. Ходяшев, Е.А. Тиньгаева

Елена Абрамовна Фарберова (ORCID 0000-0002-9166-7761), Екатерина Вячеславовна Чашчина (ORCID 0009-0005-6013-5593), Сергей Александрович Смирнов (ORCID 0000-0002-3155-6998), Егор Александрович Першин (ORCID 0009-0002-9989-6523)\*, Николай Борисович Ходяшев (ORCID 0000-0003-0597-8852), Елена Александровна Тиньгаева (ORCID 0000-0002-0593-1176)

Кафедра химии и биотехнологии, Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Комсомольский пр., 29, Пермь, Российская Федерация, 614990

E-mail: elenafarb@gmail.com, ekaterinakornilova95@yandex.ru, po4tamoia@mail.ru, egorpershin96@gmail.com\*, nhodyashev@yandex.ru, teengaeva@mail.ru

*Работа посвящена исследованию свойств активной угольной ткани как носителя хемосорбента для поглощения аммиака. Проведены исследования пористой структуры активной угольной ткани, в результате которых установлено, что она обладает развитой системой пор. Суммарный объем пор образца активной угольной ткани составляет 1,3 см<sup>3</sup>/г, при этом доля сорбционных пор составляет 38%, доля микропор в объеме сорбционных пор – 88%. Показано, что активная угольная ткань обладает гидрофобными свойствами. Проведено импрегнирование активной угольной ткани солями меди (II) с целью получения хемосорбента для поглощения аммиака. При нанесении сульфата меди (II) на активную угольную ткань на ее поверхности происходит кристаллизация добавки, что приводит к частичной блокировке сорбционных пор (снижение объема сорбционных пор составило 29,2%). На поверхности активной угольной ткани образуются кристаллиты сульфата меди (II), размеры которых находятся в довольно широком диапазоне (1,29-746 мкм). Кристаллиты хлорида меди (II) при нанесении на поверхность активной угольной ткани частично заполняют микро- и мезопоры, снижение объема микропор достигло 39,6%. Установлено, что в основном при нанесении добавки изменяется объем пор с шириной щели 0,52-0,77 нм и 1,10-1,40 нм. Равновесную емкость поглощения аммиака хемосорбентами определяли в статических условиях. Показано, что наибольшей равновесной емкостью обладает хемосорбент с нанесенной добавкой хлорида меди (II). Равновесная емкость хемосорбентов по аммиаку, в основном, зависит от доступности поверхности сорбционного пространства активной угольной ткани (АУТ) для молекул аммиака.*

**Ключевые слова:** активная угольная ткань, волокнистый хемосорбент, активные добавки, пористая структура, равновесная сорбционная емкость

## STUDY OF THE PROPERTIES OF ACTIVE CARBON FABRIC AND A CHEMOSORBENT BASED ON IT FOR AMMONIA ABSORPTION

E.A. Farberova, E.V. Chashchina, S.A. Smirnov, E.A. Pershin, N.B. Khodyashev, E.A. Tin'gaeva

Elena A. Farberova (ORCID 0000-0002-9166-7761), Ekaterina V. Chashchina (ORCID 0009-0005-6013-5593), Sergey A. Smirnov (ORCID 0000-0002-3155-6998), Egor A. Pershin (ORCID 0009-0002-9989-6523)\*, Nikolay B. Khodyashev (ORCID 0000-0003-0597-8852), Elena A. Tin'gaeva (ORCID 0000-0002-0593-1176)

Department of Chemistry and Biotechnology, Perm National Research Polytechnic University, Komsomolskiy ave., 29, Perm, 614990, Russia

E-mail: elenafarb@gmail.com, ekaterinakornilova95@yandex.ru, po4tamoia@mail.ru, egorpershin96@gmail.com\*, nhodyashev@yandex.ru, teengaeva@mail.ru

*The work is devoted to the study of the properties of active carbon fabric as a carrier of a chemisorbent for ammonia adsorption. Studies of the porous structure of active carbon fabric were carried out, as a result of which it was found that it has a developed pore system. The total pore volume of the active carbon fabric sample is 1.3 cm<sup>3</sup>/g, wherein the sorption pores content is 38% and the percentage of micropores in the volume of sorption pores is 88%. Active carbon fabric is shown to have hydrophobic properties. The active carbon fabric was impregnated with copper (II) salts in order to obtain a chemisorbent for adsorbing ammonia. When copper (II) sulfate is applied to active carbon fabric, crystallization of the additive occurs on its surface, which leads to partial blocking of the sorption pores (the decrease in the volume of sorption pores was 29.2%). On the surface of the active carbon fabric, crystallites of copper (II) sulfate are formed, the sizes of which are in a fairly wide range (1.29-746 μm). Crystallites of copper (II) chloride, when applied to the surface of active carbon fabric, partially fill micro- and mesopores, the decrease in the volume of micropores reached 39.6%. It was found that mainly when applying the additive, the pore volume changes with a half-width gap of 0.52-0.77 nm and 1.10-1.40 nm. The equilibrium ammonia adsorption capacity of chemisorbents was determined under static conditions. Chemisorbent with copper (II) chloride additive is shown to have the highest equilibrium capacity. The equilibrium ammonia capacity of chemisorbents mainly depends on the availability of the surface of the active carbon fabric (ACF) sorption space for ammonia molecules.*

**Keywords:** activated carbon fabric, fibrous chemisorbent, active additives, porous structure. equilibrium sorption capacity

**Для цитирования:**

Фарберова Е.А., Чашчина Е.В., Смирнов С.А., Першин Е.А., Ходяшев Н.Б., Тиньгаева Е.А. Исследование свойств активной угольной ткани и хемосорбента на ее основе для поглощения аммиака. *Изв. вузов. Химия и хим. технология.* 2025. Т. 68. Вып. 3. С. 95–103. DOI: 10.6060/ivkkt.20256803.7120.

**For citation:**

Farberova E.A., Chashchina E.V., Smirnov S.A., Pershin E.A., Khodyashev N.B., Tin'gaeva E.A. Study of the properties of active carbon fabric and a chemisorbent based on it for ammonia absorption. *ChemChemTech [Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Khim. Khim. Tekhnol.]*. 2025. V. 68. N 3. P. 95–103. DOI: 10.6060/ivkkt.20256803.7120.

## ВВЕДЕНИЕ

В условиях индустриализации в связи с загрязненностью окружающей среды и рабочей зоны предприятий возникает необходимость защиты органов дыхания работников от воздействия вредных веществ, которое может привести к ряду заболеваний.

В настоящее время предприятиями выпускается большой ассортимент различных марок средств индивидуальной защиты органов дыхания (СИЗ ОД), отвечающих определенным требованиям защиты органов дыхания в конкретных условиях их эксплуатации.

На сегодняшний день существует необходимость использования СИЗ ОД для защиты работников от малых концентраций вредных веществ (в пределах 5-10 ПДК), которые могут содержаться в

воздухе рабочей зоны. Данная проблема может быть решена применением фильтрующе-сорбирующих облегченных респираторов, в которых в качестве поглощающего материала можно использовать хемосорбенты на основе активного углеродного волокнистого материала [1].

Активная угольная ткань (АУТ), полученная путем двухступенчатого термического модифицирования тканого полотна из волокон различной природы, представляет собой высокопористый материал, обладающий хорошими сорбционными характеристиками. Углеродные волокна обладают развитой системой микропор, расположенных перпендикулярно оси волокна, что обеспечивает высокую скорость сорбционных процессов. Данный факт делает активные углеродные волокнистые материалы оптимальными сорбентами для применения в различных сферах жизнедеятельности [2].

В.В. Самониным с соавторами в работе [3] представлен обширный обзор направлений применения углеродных сорбирующих материалов. Отмечено, что наиболее важными направлениями применения данных материалов являются средства защиты от токсичных компонентов и медицина, в частности, аппликационно-сорбирующие повязки. Установлено, что применяемая для заживления поверхности ран АУТ обладает высокой пластичностью и сорбционными свойствами благодаря своей пористой структуре, что способствует уменьшению времени регенерации тканей и не травмирует кожные покровы.

Возможность использования активных углеродных волокнистых материалов типа Бусофит, АУТ-М, Увисорб в респираторной технике отмечена в работах А.В. Коробейниковой [4] и Л.Ю. Кудрявцевой [5].

В статье [6] приведены результаты исследований условий синтеза активированного углеродного материала на основе гидратцеллюлозного волокна. Показано влияние условий активации на характеристики пористой структуры и сорбционные свойства полученных образцов сорбента. Объем замкнутых пор достигает максимальных значений ( $0,49 \text{ см}^3/\text{г}$ ) при температуре термообработки  $1770 \text{ К}$ .

Зависимость характеристик пористой структуры активных углеродных тканей от условий их получения отмечена в статье А.Л. Сукерман [7]. Образцы АУТ, синтезированные в работе, исследованы в процессах очистки жидких сред.

Анализ источников информации свидетельствует, что в настоящее время активно ведутся исследования по разработке и применению волокнистых сорбентов для поглощения токсичных веществ из газовой среды. Тем не менее, проблема создания волокнистых хемосорбентов в виде ткани именно для облегченных СИЗ ОД является весьма актуальной.

Многолетние исследования Л.А. Земсковой демонстрируют возможность создания мезопористых композиционных материалов на основе углеродных волокон путем осаждения на их поверхности гидроксидов металлов или биополимера хитозана. В работах [8-12] описаны методы химического и электрохимического осаждения оксидов марганца, титана, никеля, меди (I).

В статье [13] приведены результаты исследований влияния мелкодисперсной меди, нанесенной на поверхность АУТ, на характер пористой структуры полученного хемосорбента. Показано, что удельная поверхность и объем сорбционных

пор снижаются относительно немодифицированного образца АУТ от 4 до 40% в зависимости от условий нанесения добавки.

В работе [14] обсуждаются свойства хемосорбционных материалов на основе активных углеродных тканей, предназначенных для использования в респираторах облегченного типа для защиты от диоксида серы и аммиака.

Для разработки сорбционного материала на основе АУТ большой интерес представляют исследования по модифицированию поверхности активированных углей.

В работе [15] приведены результаты исследования влияния различных катионов металлов ( $\text{Co}^{2+}$ ,  $\text{Cu}^{2+}$ ,  $\text{Zn}^{2+}$ ) на динамическую активность по отношению к аммиаку при нанесении их на поверхность гранулированных активированных углей. Выявлено, что добавка соли меди (II) обеспечивает наибольшее значение сорбционной емкости по аммиаку. Также установлено, что рост динамической активности по аммиаку начинается с содержания добавки соли меди (II) от 13 мас. %.

Исследовано влияние ультразвуковой обработки образца, гранулированного хемосорбента с активной добавкой сульфата меди (II) на способность поглощать аммиак из газовой смеси [16]. Показано, что при ультразвуковой обработке образца с частотой  $22 \text{ кГц}$  в течение 5 мин емкость поглощения аммиака возрастает примерно на 10%.

В статье [17] для синтеза углеродного хемосорбента аммиака и сероводорода предлагается на поверхность гранулированного активированного угля наносить сульфат меди (II) в количестве 15-16% мас.

Сульфат меди (II), используемый в качестве активной химической добавки в составе поглотителя, обеспечивает его хемосорбционные свойства по отношению к аммиаку и сероводороду. Катион меди (II) является эффективным комплексообразователем при взаимодействии с аммиаком. Поглощение аммиака из газовой смеси происходит благодаря хемосорбционному взаимодействию с сульфатом меди (II) на поверхности углеродного носителя. Константа устойчивости аммиаката меди (II) имеет достаточно высокое значение, что свидетельствует о прочном связывании аммиака в комплекс ( $K_{\text{уст.}} = 1,07 \cdot 10^{12}$ , при значениях координационного числа 4  $[\text{Cu}(\text{NH}_3)_4]^{2+}$ ).

Присутствие малых, (но превышающих ПДК) концентраций аммиака в воздухе рабочей зоны предприятий создает предпосылки к разработке фильтрующе-сорбирующих респираторов на

основе хемосорбционного материала, прочно связывающего аммиак.

Данная работа посвящена исследованию свойств активной угольной ткани как носителя хемосорбента аммиака. Целью работы является исследование факторов влияния активного компонента в составе углеволоконистого хемосорбента аммиака на его сорбционные свойства.

#### МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

В качестве носителя хемосорбента использовали образцы активной угольной ткани марки Бусофит, полученной путем двухступенчатого термического модифицирования вискозного полотна саржевого плетения.

Структуру поверхности образцов АУТ анализировали с использованием сканирующего электронного микроскопа Hitachi S-3400N и рентгеновского дифрактометра Shimadzu XRD-7000 с использованием ПО XRD 6000/7000 Ver. 5.21. Методом адсорбции-десорбции азота при температуре 77К с использованием быстродействующего анализатора сорбции газов Quantachrome Nova 1200е определяли параметры пористой структуры образцов АУТ [18]. Кажущуюся плотность образцов АУТ определяли с использованием пикнометра GeoPyc 1360 [18]. Определение поверхностных функциональных групп поводилось методом кислотно-основного титрования вытяжек образцов ткани [19]. Поглотительную способность по аммиаку определяли в статических условиях с использованием вакуумного эксикатора, в который помещали образцы хемосорбента массой 0,1-0,2 г и герметизировали.

В эксикаторе создавали разрежение и подавали заданный объем аммиака. Пробы выдерживали в атмосфере аммиака в течение 7 сут. По окончании эксперимента эксикатор разгерметизировали и определяли массы образцов, насыщенных аммиаком.

Сорбционную емкость хемосорбента ( $E_{NH_3}$ , г/г сорбента) рассчитывали по формуле:

$$E_{NH_3} = \frac{m_{нас} - m_{исх}}{m_{исх}},$$

где  $m_{исх}$  – масса навески хемосорбента до испытания;  $m_{нас}$  – масса навески хемосорбента, насыщенной аммиаком.

#### РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Методом электронной микроскопии определены характеристики структуры полотна АУТ. Толщина вертикальных волокон, формирующих

полотно, составила 500-550 мкм; толщина горизонтальных волокон – 550-700 мкм; толщина нитей плетения волокна 5,62 мкм; межволоконные пространства 2-10 мкм.

В табл. 1 приведены технические характеристики и параметры пористой структуры исследованного в работе образца АУТ.

Таблица 1

Характеристики образца АУТ  
Table 1. Characteristics of AUT sample

Характеристика	Значение	
m, г/м <sup>2</sup>	300±30	
Толщина, мм	0,35-0,45	
Содержание золы, %	0,5	
S <sub>БЭТ</sub> , м <sup>2</sup> /г	860±26	
W <sub>0</sub> , см <sup>3</sup> /г	0,49±0,01	
V <sub>ми</sub> , см <sup>3</sup> /г	0,43±0,01	
ρ <sub>ист</sub> , г/см <sup>3</sup>	1,96	
ρ <sub>каж</sub> , г/см <sup>3</sup>	0,54	
П, %	72	
V <sub>Σ</sub> , см <sup>3</sup> /г	1,30	
Содержание поверхностных функциональных групп, ммоль-экв/г	основного характера	0,47
	кислотного характера	0,44

Примечание: m – масса 1 квадратного метра АУТ, г/м<sup>2</sup>; S<sub>БЭТ</sub> – площадь удельной поверхности по методу БЭТ, м<sup>2</sup>/г; W<sub>0</sub> – предельный объем сорбционного пространства, см<sup>3</sup>/г; V<sub>ми</sub> – объем микропор по методу Дубинина-Радушкевича, см<sup>3</sup>/г; ρ<sub>ист</sub> – истинная плотность, г/см<sup>3</sup>; ρ<sub>каж</sub> – кажущаяся плотность, г/см<sup>3</sup>; П – пористость, %; V<sub>Σ</sub> – суммарный объем пор, см<sup>3</sup>/г

Note: m – mass of 1 square meter of AUT, g/m<sup>2</sup>; SBET – specific surface area according to the BET method, m<sup>2</sup>/g; W<sub>0</sub> – maximum volume of sorption space, cm<sup>3</sup>/g; V<sub>mi</sub> – micropore volume according to the Dubinin-Radushkevich method, cm<sup>3</sup>/g; ptr – true density, g/cm<sup>3</sup>; ρ<sub>каж</sub> – apparent density, g/cm<sup>3</sup>; P – porosity, %; V<sub>Σ</sub> – total pore volume, cm<sup>3</sup>/g

Как следует из табл. 1, активная угольная ткань обладает развитой пористой структурой: объем сорбционных пор составляет 0,49 см<sup>3</sup>/г, доля микропор в сорбционном объеме составляет 88%, доля макропор в суммарном объеме пор – 62%.

На поверхности АУТ определяются кислородсодержащие функциональные группы основного (0,47 ммоль экв/г) и кислотного (0,44 ммоль экв/г) характера.

Исследована способность АУТ поглощать как пары воды, так и жидкую воду в равновесных статических условиях (табл. 2). Эксперимент по поглощению паров воды проводили эксикаторным методом в условиях различной относительной влажности от 0 до 100%. Исследование способности АУТ поглощать жидкую воду проводилось пу-

тем погружения высушенных образцов АУТ в емкость с водой и выдержки их в течение разных промежутков времени от 10 до 90 мин с интервалом 10 мин. По истечении заданного времени образцы вынимали из емкости, давали стечь избытку воды (во всех опытах избыток воды был незначительный) и сразу определяли влажность материалов.

Таблица 2

**Поглощение парообразной и жидкой воды образцом АУТ**

**Table 2. Absorption of vaporous and liquid water by active carbon fabric sample**

Поглощение паров воды при $T = 25\text{ }^{\circ}\text{C}$		
Относительная влажность при $T = 25\text{ }^{\circ}\text{C}$ , %	Равновесное $P_{\text{парц. (воды), Па}}$	$V_{\text{паров воды, г/г}}$
0	101	0
40	1115	0,001
60	1824	0,229
80	2634	0,268
100	3141	0,418
Поглощение жидкой воды		
Время контакта, мин	$V_{\text{жидк воды, см}^3/\text{г}}$	
10	0,71±0,01	
20	0,69±0,01	
30	0,73±0,03	
40	0,73±0,03	
50	0,67±0,03	
60	0,75±0,05	
70	0,64±0,06	
80	0,73±0,03	

При относительном парциальном давлении паров воды 3141 Па (100% относительной влажности) объем поглощенных АУТ паров соответствует объему ее микропор. Данный факт можно объяснить тем, что кинетический диаметр молекул газообразной воды составляет около 0,3 нм, что меньше среднего размера микропор в образце АУТ (полуширина щели микропор 0,62 нм). Молекулы паров воды при влажности 100% практически полностью заполняют поровое пространство микропор.

Объем поглощенной жидкой воды в расчете на 1 г сорбента практически мало зависит от времени контакта (0,64-0,75 см<sup>3</sup>/г). Интересно отметить, что данный объем соизмерим с объемом макропор АУТ (0,87 см<sup>3</sup>/г) (табл. 1).

Механизм поглощения жидкой воды отличается от процесса поглощения паров воды одним и тем же материалом, т.к. в жидкой воде образуются водородные связи и формируются кластеры с размерами:  $a = 1,1\text{ мкм}$ ,  $b = 1,1\text{ мкм}$ ,  $c = 0,0203\text{ мкм}$ , что значительно превышает размеры сорбционных

пор, но позволяет кластерам жидкой воды накапливаться в макропорах. Проведенные выше исследования подтверждают гидрофобные свойства волокон АУТ.

Одной из важных задач исследования является выбор соли меди (II) для синтеза волокнистого углеродного хемосорбента аммиака.

Добавки, активные по отношению к аммиаку, наносили на поверхность АУТ из водных растворов солей меди (II) путем погружения образца ткани с известной массой в раствор соли заданной концентрации и выдержки в растворе определенное время (60 мин) при температуре 40 °С в закрытой емкости. По истечении заданного времени пропитанный образец вынимали из раствора, давали стечь избытку жидкости и сушили.

В качестве активных химических добавок выбраны хлорид и сульфат меди (II). Растворимость сульфата меди (II) значительно ниже растворимости хлорида меди (II), при температуре 40 °С растворимость сульфата меди (II) в 100 г воды составляет 28,7 г соли, растворимость хлорида меди (II) в тех же условиях – 87,6 г. Для пропитки использовали растворы, содержащие сульфат меди(II), хлорид меди (II), смесь сульфата и хлорида меди (II) в равных массовых соотношениях. Концентрация пропиточных растворов составляла 250 г/дм<sup>3</sup> в расчете на состав безводных солей.

В табл. 3 приведены характеристики пористой структуры образцов хемосорбентов в сравнении с АУТ в зависимости от состава активной добавки. Изменения параметров пористой структуры образцов, полученных в результате пропитки, представлены в процентном соотношении относительно характеристик пористой структуры исходного образца АУТ.

Как видно из табл. 3, основные параметры пористой структуры (площадь удельной поверхности по методу БЭТ, предельный объем сорбционного пространства, объем микропор по методу Дубинина-Радушкевича) для всех хемосорбентов снижаются по сравнению с их основой – АУТ. Наиболее существенные изменения наблюдаются при нанесении добавки хлорида меди и смеси солей.

Величины показателей пористой структуры (кроме  $V_{\text{ме}}$  (объем мезопор)) образцов хемосорбента с нанесенной добавкой сульфата меди (II) составляют порядка 67-71% относительно исходных образцов АУТ; для образцов с добавкой хлорида меди (II) – 39-47%; для образцов, пропитанных раствором, содержащим обе соли меди (II) – 55-59%.

Объем мезопор всех образцов относительно исходных образцов АУТ составляет 85,7%.

При анализе характера распределения объема пор по размерам показывает, что нанесение активных добавок независимо от состава снижает объем пор с полушириной щели микропор от 0,52 до 0,77 нм на 28-33%. В интервале полуширины щели микропор 1,1-1,4 нм снижение объема пор на 33% наблюдается для хемосорбента с добавкой хлорида меди (II) и композиционного хемосорбента. Для хемосорбента с нанесенной добавкой сульфата меди (II) объем в данном интервале изменяется в меньшей степени (на 20%).

Такой характер изменения характеристик пористой структуры хемосорбентов по сравнению с АУТ, может быть связан со структурными характеристиками солей меди (II) и особенностями их кристаллизации на поверхности пористого волокнистого носителя.

Равновесную емкость по аммиаку образцов хемосорбентов определяли в статических условиях, выдерживая в герметично закрытом эксикаторе при содержании аммиака 0,1 моль.

Равновесная емкость по аммиаку зависит

от типа активной добавки, однако четкой зависимости от содержания катиона меди в сорбенте не наблюдается.

Кристаллизация сульфата меди (II) из водных растворов протекает с образованием гидратов, в основном с пятью молекулами воды (пентагидрат сульфата меди (II) -  $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ ) [20-22], с параметрами элементарной кристаллической ячейки:  $a - 0,614$  нм,  $b - 1,074$  нм,  $c - 0,599$  нм.

При кристаллизации хлорида меди (II) из водных растворов образуются гидраты, состав которых зависит от температуры кристаллизации. При температуре ниже 42 °С образуется кристаллогидрат  $\text{CuCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ . Дигидрат хлорида меди (II) представляет собой кристаллы ромбической сингонии, обладающие способностью сорбировать водяные пары из воздуха.

Для элементарной ячейки  $\text{CuCl}_2$  характерна моноклинная сингония с параметрами равными:  $a - 0,685$  нм,  $b - 0,330$  нм,  $c - 0,670$  нм.

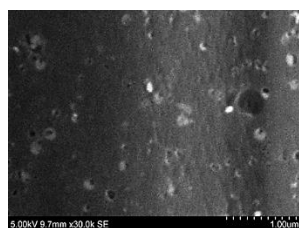
Методом электронной микроскопии исследована структура образцов хемосорбентов с добавками сульфата меди (II), хлорида меди (II). Микрофотографии приведены на рис. 1а и 1б.

Таблица 3

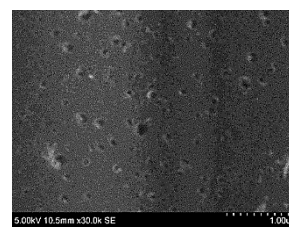
Характеристики образцов хемосорбентов на основе АУТ  
Table 3. Characteristics of the porous structure of ACF-based samples

Показатель	АУТ	Добавка соли $\text{Cu}^{2+}$		
		$\text{CuSO}_4$	$\text{CuCl}_2$	$\text{CuSO}_4 + \text{CuCl}_2$
Содержание добавки в пересчете на медь, г/г сорбента	-	0,072	0,124	0,208
$E_{\text{NH}_3}$ , мг/г сорбента	70	134	152	53
Характеристики пористой структуры образцов				
$S_{\text{БЭТ}}$ , м <sup>2</sup> /г	860	595	346	481
$S_{\text{БЭТ}}$ , % от значения в АУТ	-	69,2	40,2	55,9
$W_0$ , см <sup>3</sup> /г	0,49	0,35	0,23	0,29
$W_0$ , % от значения в АУТ	-	71,4	46,9	59,2
$V_{\text{ми}}$ , см <sup>3</sup> /г	0,43	0,29	0,17	0,24
$V_{\text{ми}}$ , % от значения в АУТ	-	67,4	39,5	55,8
$V_{\text{ме}}$ , см <sup>3</sup> /г	0,07	0,06	0,06	0,06
$V_{\text{ме}}$ , % от значения в АУТ	-	85,7	85,7	85,7
X, нм	0,62	0,62	0,80	0,65
X, % от значения АУТ	-	100,0	129,0	104,8

Примечание: X – полуширина щели микропор, нм  
Note: X – half-width of the micropore gap, nm



а



б

Рис. 1. Микрофотография поверхности хемосорбентов с добавками солей меди (II) при увеличении 30000X:  $\text{CuSO}_4$  (а) и  $\text{CuCl}_2$  (б)  
Fig. 1. Micrograph of the surface of chemisorbents with additions of copper (II) salts at magnification 30000X:  $\text{CuSO}_4$  (a) and  $\text{CuCl}_2$  (b)

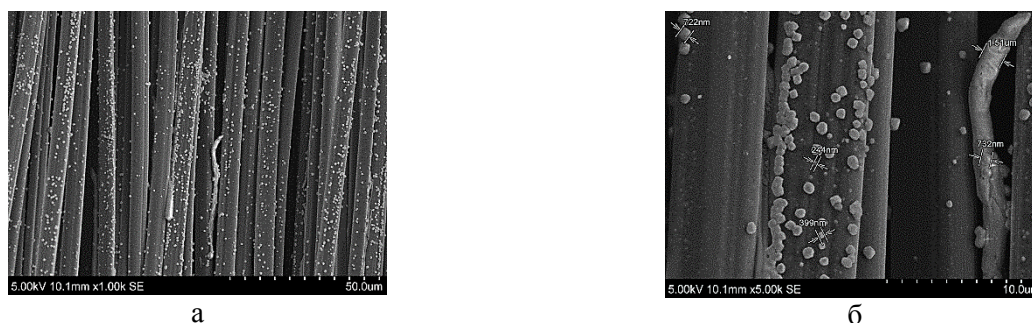


Рис. 2. Микрофотография поверхности хемосорбента с комплексной добавкой солей меди (II) при увеличении 1000X (а) и при увеличении 5000X (б)

Fig. 2. Photomicrograph of chemisorbent surface with complex addition of copper (II) salts at 1000X magnification (a) and at 5000X magnification (б)

На микрографиях (рис. 1а) видно, что при нанесении сульфата меди (II) часть сорбционных пор блокируется крупными кристаллитами соли (1,29-746,0 мкм), что свидетельствует о кристаллизации сульфата меди (II) на поверхности АУТ. При этом кристаллиты сами имеют некоторую пористость (0,07 см<sup>3</sup>/г) за счет достаточно больших размеров элементарной кристаллической ячейки, которые превышают размеры сорбционных пор АУТ. Данное явление нехарактерно для хлорида меди (II). Размеры формирующихся кристаллитов хлорида меди (II) соизмеримы с размерами сорбционных пор, и на микрофотографии видно, что добавка в основном располагается во внутреннем пространстве сорбционных пор, что существенно сокращает их объем (рис. 1б).

Параметры пористой структуры хемосорбента, полученного с использованием композиционного пропиточного раствора, имеют среднее значение между таковыми для хемосорбентов с индивидуальными добавками.

Методом сканирующей электронной микроскопии показано, что при совместном нанесении солей сульфата и хлорида меди (II) на поверхности АУТ формируются кристаллиты размером 0,244-1,510 мкм (что значительно меньше, чем кристаллиты, образующиеся при нанесении сульфата меди (II)), практически полностью покрывающие поверхность ткани (рис. 2а и 2б).

Определение элементного состава кристаллитов указывает на совместную кристаллизацию сульфата и хлорида меди (II): среднее содержание элементов (атом. %): О – 57,3; S – 7,9; Cl – 14,9; Cu – 19,8.

При анализе способности композиционного хемосорбента (CuSO<sub>4</sub> + CuCl<sub>2</sub>) поглощать аммиак наблюдается снижение его равновесной сорбционной емкости до 50 мг/г, что даже ниже этой величины для АУТ (70 мг/г).

Процесс поглощения аммиака на поверхности волокнистого хемосорбента, по-видимому, начинается с предварительной адсорбции его на поверхности сорбционных пор носителя и только после этого происходит химическое взаимодействие с активной добавкой и образование прочного комплексного соединения. При введении в состав хемосорбента композиционной добавки, большая часть поверхности АУТ покрыта смешанными кристаллитами, и доступ аммиака к значительной части порового пространства ограничен. Это и приводит к потере поглотительной способности композиционного образца.

#### ВЫВОДЫ

В результате проведенных исследований определены параметры пористой структуры АУТ и хемосорбентов с активными добавками CuSO<sub>4</sub>, CuCl<sub>2</sub> и их смеси. Установлено, что изменение параметров пористой структуры при нанесении CuSO<sub>4</sub> связано с частичной блокировкой сорбционных пор, а для CuCl<sub>2</sub> – с частичным размещением кристаллитов соли в объеме сорбционных пор. При совместном нанесении солей сульфата и хлорида меди (II) на поверхности АУТ формируются кристаллиты значительно меньших размеров, чем кристаллиты, образующиеся при нанесении сульфата меди (II), которые практически полностью покрывают поверхность ткани и затрудняют поглощение аммиака. Состав кристаллитов включает атомы кислорода, серы, хлора и меди, что может указывать на совместную кристаллизацию сульфата и хлорида меди (II) при нанесении на поверхность АУТ из раствора, содержащего обе соли. Исследование сорбционных свойств полученных хемосорбентов по аммиаку показало, что более высокой емкостью поглощения обладают образцы с добавкой хлорида меди (II).

*Исследования проведены в рамках общего координационного плана научного совета РАН по*



физической химии (секция «Адсорбционные явления») на 2024 г. (№ 24-03-460-09).

Работа выполнена с использованием научного оборудования Центра коллективного пользования «Центр наукоемких химических технологий и физико-химических исследований» и научно-образовательного центра технологии сорбентов и катализаторов ПНИПУ.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов, требующего раскрытия в данной статье.

The studies were conducted within the framework of the general coordination plan of the Scientific Council of the Russian Academy of Sciences on Physical Chemistry (section "Adsorption Phenomena") for 2024 (No. 24-03-460-09).

The work was carried out using the scientific equipment of the Center for Collective Use "Center for High-Tech Chemical Technologies and Physicochemical Research" and the Scientific and Educational Center for Sorbent and Catalyst Technology of PNIPU.

The authors declare the absence of a conflict of interest warranting disclosure in this article.

## ЛИТЕРАТУРА

1. **Талипова М.В., Лянг А.В., Щербак Н.В.** Разработка фильтрующе-сорбирующих материалов в целях формирования ассортимента современных фильтров для противогазов и респираторов. *Лесной вестн.* 2023. № 1. С. 121-130. DOI: 10.18698/2542-1468-2023-1-121-133.
2. **Фарберова Е.А., Тингаева Е.А., Максимов А.С.** Получение сорбционного материала с бактерицидными свойствами для использования в водоподготовке. *Вестн. ПНИПУ. Хим. технол. и биотехнол.* 2012. № 14. С. 193-197.
3. **Самонин В.В., Подвязников М.Л., Спиридонова Е.А.** Перспективные направления применения углеродных сорбирующих материалов. Синтез, свойства и применение углеродных адсорбентов. М.: Издат. дом «Граница». 2021. С. 5-21.
4. **Коробейникова А.В., Астахов В.С., Подплетнева Г.В.** Фильтрокаталитический волокнистый материал и облегченный респиратор для защиты от монооксида углерода. *Безоп. жизнедеят.* 2011. № 6. С. 2-7.
5. **Кудрявцева Л.Ю., Ивахнюк Г.К., Малинин В.Р.** Экспериментальная оценка ресурса защитной мощности газопылезащитного респиратора "Кама-А". *Журн. прикл. хим.* 1998. Т. 71. В. 8. С. 1403 - 1405.
6. **Дробышев В.М., Ляшенко С.Е., Соболева И.В.** Изучение зависимости свойств углеродных волокнистых адсорбентов от условий их получения. *Успехи в химии и хим. технологии.* 2013. № 1. С. 102-110.
7. **Cukierman A.-L.** Development and Environmental Applications of Activated Carbon Cloths. *International Scholarly Research Notices.* 2013. 31 p. DOI: 10.1155/2013/261523.
8. **Земскова Л.А.** Модифицированные углеродные волокна: сорбенты, электродные материалы, катализаторы. *Вестн. ДВО РАН.* 2009. № 2. С. 39-52.
9. **Земскова Л.А., Войт А.В., Кайдалова Т.А.** Органоминеральные композиты оксид меди/хитозан/углеродное волокно, полученные методом электроосаждения. *Журн. прикл. хим.* 2012. Т. 85. № 8. С. 1273-1281. DOI: 10.1134/S1070427212080137.
10. **Земскова Л.А., Войт А.В., Баринов Н.Н.** Композиционные сорбенты на основе синтетического оксида марганца и углеродного волокна. *Журн. неорг. химии.* 2016. Т. 61. № 12. С. 1628-1634. DOI: 10.7868/S0044457X16120229.
11. **Gopinath A., Kadirvelu K.** Strategies to design modified activated carbon fibers for the decontamination of water and air. *Environ. Chem. Lett.* 2018. V. 16. P. 1137-1168. DOI: 10.1007/s10311-018-0740-9.
12. **Mustafa L., Yermakhanova A., Ismailov M.** The effect of carbon fabrics modification on the strength of carbon fiber

## REFERENCES

1. **Talipova M.V., Liang A.V., Shcherbak N.V.** Development of filtering and sorbing materials in order to form an assortment of modern filters for gas masks and respirators. *Lesnoy Vestn.* 2023. N 1. P. 121-130 (in Russian). DOI: 10.18698/2542-1468-2023-1-121-133.
2. **Farberova E.A., Tingaeva E.A., Maksimov A.C.** Obtaining sorption material with bactericidal properties for use in water treatment. *Vestn. PNIPU. Khim. Tekhnol. Biotekhnol.* 2012. N 14. P. 193-197 (in Russian).
3. **Samonin V.V., Podvyaznikov M.L., Spiridonova E.A.** Promising directions for the use of carbon sorbent materials. Synthesis, properties and application of carbon adsorbents. M.: Izd-vo "Granitsa". 2021. P. 5-21 (in Russian).
4. **Korobeinikova A.V., Astakhov V.S., Podpletneva G.V.** Filter catalytic fibrous material and lightweight respirator for protection against carbon monoxide. *Bezop. Zhiznedeyat.* 2011. N 6. P. 2-7 (in Russian).
5. **Kudryavtseva L.Yu., Ivakhnyuk G.K., Malinin V.R.** Experimental assessment of the protective power resource of the Kama-A gas-dust respirator. *Zhurnal Prikl. Khimii.* 1998. V. 71. N 8. P. 1403-1405 (in Russian).
6. **Drobyshev V.M., Lyashenko S.E., Soboleva I.V.** Study of the dependence of the properties of carbon fibrous adsorbents on the conditions for their production. *Usp. Khimi Khim. Tekhnol.* 2013. N 1. P. 102-110 (in Russian).
7. **Cukierman A.-L.** Development and Environmental Applications of Activated Carbon Cloths. *International Scholarly Research Notices.* 2013. 31 p. DOI: 10.1155/2013/261523.
8. **Zemskova L.A.** Modified carbon fibers: sorbents, electrode materials, catalysts. *Vestn. DVO RAN.* 2009. N 2. P. 39-52 (in Russian).
9. **Zemskova L.A., Voight A.V., Kaydalova T.A.** Organomineral composites of copper oxide/chitosan/carbon fiber obtained by electrodeposition. *Zhurn. Prikl. Khim.* 2012. V. 85. N 8. P. 1273-1281 (in Russian). DOI: 10.1134/S1070427212080137.
10. **Zemskova L.A., Voight A.V., Barinov N.N.** Composite sorbents based on synthetic manganese oxide and carbon fiber. *Zhurn. Neorg. Khim.* 2016. V. 61. N 12. P. 1628-1634 (in Russian). DOI: 10.7868/S0044457X16120229.
11. **Gopinath A., Kadirvelu K.** Strategies to design modified activated carbon fibers for the decontamination of water and air. *Environ. Chem. Lett.* 2018. V. 16. P. 1137-1168. DOI: 10.1007/s10311-018-0740-9.
12. **Mustafa L., Yermakhanova A., Ismailov M.** The effect of carbon fabrics modification on the strength of carbon fiber reinforced plastic. *Complex Use Mineral Resources.* 2019. V. 309. N 2. P. 68-75. DOI: 10.31643/2019/6445.18.



- reinforced plastic. *Complex Use Mineral Resources*. 2019. 309(2). P. 68-75. DOI: 10.31643/2019/6445.18.
13. **Фарберова Е.А., Катыева А.Ю., Смирнов С.А.** Исследование возможности использования химического метода восстановления мелкодисперсных частиц металлов для получения бактерицидных сорбентов. *Изв. вузов. Химия и хим. технология*. 2020. Т. 63. Вып. 3. С. 46-53. DOI: 10.6060/ivkkt.20206303.6047.
  14. **Кудрявцева Л.Ю., Фарберова Е.А., Ивахнюк Г.К.** Хемосорбционные материалы для газопылезащитных респираторов. *Журн. прикл. хим.* 1997. Т. 70. В. 5. С. 751-754.
  15. **Фарберова Е.А., Тингаева Е.А., Кобелева А.Р.** Поглотитель аммиака и сероводорода на основе активных углей и исследование его свойств. *Бутлер. сообщ.* 2017. Т. 50. № 6. С. 41-47.
  16. **Глушанков К.В., Кобелева А.Р., Фарберова Е.А.** Влияние ультразвуковой обработки на свойства поглотителя аммиака, предназначенного для средств индивидуальной защиты органов дыхания. Тез. докл. Всерос. науч.-практ. конф. молодых ученых, аспирантов, студентов и школьников. Пермь: Изд-во ПНИПУ. 2017. С. 472-476.
  17. **Фарберова Е.А., Цуканова А.Н., Смирнов С.А.** Влияние отдельных факторов на формирование кристаллической фазы активного компонента и свойства углеродного химического поглотителя аммиака и сероводорода. *Изв. вузов. Химия и хим. технология*. 2022. Т. 65. Вып. 6. С. 27-36. DOI: 10.660/ivkkt.20226506.6540.
  18. **Тингаева Е.А., Фарберова Е.А., Кузьминых К.Г.** Исследование пористой структуры материалов. Основы. Методики. Оборудование. Учеб.-метод. пособие. Пермь: Изд-во ПНИПУ. 2022. 78 с.
  19. **Фарберова Е.А., Тингаева Е.А., Кобелева А.Р.** Технология получения активных углей и их применение. Пермь: Изд-во ПНИПУ. 2018. 147 с.
  20. **Богдан Т.В.** Кристаллические структуры бинарных соединений с ковалентными связями. М: Изд-во МГУ. 2015. 30 с.
  21. **Кипер Р.А.** Физико-химические свойства веществ. Справочник по химии. Хабаровск. 2013. 1016 с.
  22. **Цуканова А.Н., Фарберова Е.А., Ходяшев Н.Б., Кузьминых К.Г., Казанцев А.Л., Лимонов Н.В.** Усовершенствование метода изготовления химического поглотителя аммиака и сероводорода. *Изв. вузов. Химия и хим. технология*. 2021. Т. 64. Вып. 3. С. 66-72. DOI: 10.6060/ivkkt.20216403.6270.
  13. **Farberova E.A., Katysheva A. Yu., Smirnov S.A.** Study of the possibility of using the chemical method of reducing fine metal particles to obtain bactericidal sorbents. *ChemChemTech [Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Khim. Khim. Tekhnol.]*. 2020. V. 63. N 3. P. 46-53 (in Russian). DOI: 10.6060/ivkkt.20206303.6047.
  14. **Kudryavtseva L.Yu., Farberova E.A., Ivakhnyuk G.K.** Chemisorption materials for gas-dust respirators. *Zhurn. Prikl. Khim.* 1997. V. 70. 5. P. 751-754 (in Russian).
  15. **Farberova E.A., Tingaeva E.A., Kobleva A.R.** Ammonia and hydrogen sulfide absorber based on active coals and study of its properties. *Butlerov. Soobshch.* 2017. V. 50. N 6. P. 41-47 (in Russian).
  16. **Glushankov K.V., Kobleva A.R., Farberova E.A.** The effect of ultrasound treatment on the properties of an ammonia absorber intended for personal respiratory protection equipment. *Khimiya. Ekologiya. Urbanistika. Materials of the All-Russian Scientific and Practical Conference of young scientists, graduate students, students and schoolchildren (with international participation)*. Perm: Izd-vo PNIPU. 2017. P. 472-476 (in Russian).
  17. **Farberova E.A., Tsukanova A.N., Smirnov S.A.** The influence of individual factors on the formation of the crystalline phase of the active component and the properties of the carbon chemical absorber of ammonia and hydrogen sulfide. *ChemChemTech [Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Khim. Khim. Tekhnol.]*. 2022. V. 65. N 6. P. 27-36 (in Russian). DOI: 10.660/20226506.6540.
  18. **Tingaeva E.A. Farberova E.A., Kuzminykh K.G.** Investigation of the porous structure of materials. *Fundamentals. Methods. Equipment*. Perm: Izd-vo PNIPU. 2022. 78 p. (in Russian).
  19. **Farberova E.A., Tingaeva E.A., Kobleva A.R.** Technology for the production of active carbons and their use. Perm: Izd-vo PNIPU. 2018. 147 p. (in Russian).
  20. **Bogdan T.V.** Crystal structures of binary compounds with covalent bonds. M: Izd-vo MGU. 2015. 30 p. (in Russian).
  21. **Kiper R.A.** Physicochemical properties of substances. *Handbook of Chemistry*. Khabarovsk. 2013. 1016 p. (in Russian).
  22. **Tsukanova A.N., Farberova E.A., Khodyashev N.B., Kuz'minykh K.G., Kazantsev A.L., Limonov N.V.** Improvement of method for producing chemical absorber of ammonia and hydrogen sulfide. *ChemChemTech [Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Khim. Khim. Tekhnol.]*. 2021. V. 64. N 3. P. 66-72 (in Russian). DOI: 10.6060/ivkkt. 20216403.6270.

Поступила в редакцию 21.06.2024

Принята к опубликованию 05.11.2024

Received 21.06.2024

Accepted 05.11.2024