

**УДК 661.183.7**

ХВОСТОВА А.И., студентка гр. МЭ-21 (РХТУ им. Д.И. Менделеева)

Научный руководитель НИСТРАТОВ А.В., к.т.н., доцент

(РХТУ им. Д.И. Менделеева)

г. Москва

**РАЗРАБОТКА МИНЕРАЛЬНО-УГЛЕРОДНЫХ АДсорбЕНТОВ ДЛЯ  
УЛАВЛИВАНИЯ ПАРОВ БЕНЗОЛА***Введение*

Адсорбционная очистка газовых выбросов в атмосферу представляет собой один из действенных способов борьбы с загрязнением окружающей среды. Данный процесс основывается на взаимодействии загрязненного воздуха с поверхностью адсорбента, что приводит к концентрированию поглощаемых веществ [1].

Бензол, представляющий собой ароматический углеводород с химической формулой  $C_6H_6$ , является бесцветной жидкостью с характерным запахом [2]. Он демонстрирует эффект суммации, что подразумевает усиление неблагоприятного воздействия на организм человека при одновременном воздействии нескольких вредных веществ [3]. В промышленности основными источниками эмиссии бензола в атмосферу являются каталитический риформинг и коксохимическая отрасль [4].

Наиболее распространёнными адсорбентами в процессах очистки газовых выбросов от паров органических растворителей являются активные угли, однако адсорбенты на основе силикагеля также вызывают интерес в качестве средств очистки благодаря своей однородной пористой структуре и высокой механической прочности. Согласно ГОСТ 3956-76 [5], силикагели являются пожаробезопасным адсорбентом, в отличие от активных углей. Серьёзным недостатком их является высокая гидрофильность, исключающая их применение для влажных выбросов. Однако гидрофобность силикагелей может быть резко повышена путём химической и термической модификации. Последнее направление с использованием отходов шинной резины как источника углеродного покрытия, основанное на предыдущих исследованиях [6], составляет предмет настоящей работы. Её практическая цель – применение полученных материалов для рекуперативной очистки воздуха от токсичных растворителей, в частности, бензола.

*Экспериментальная часть*

В качестве испытуемых адсорбентов используется активный уголь AP-A, силикагель марки КСК и экспериментальный адсорбент из смеси силикагеля марки КСК и измельченной шинной резины с фракцией 1-3 мм в массовом соотношении 1:1, полученный пиролизом со скоростью нагрева  $5^\circ C/мин$ , температурой выдержки  $600^\circ C$ , временем выдержки 1 час (далее КСК+ШР).

В таблице 1 представлены результаты сравнения некоторых показателей пористой структуры наилучшего из полученных минерально-углеродных адсорбентов с исходным силикагелем и активным углём. Объёмы сорбирующих пор определены путём контакта адсорбентов с насыщенными парами веществ в эксикаторах в течение недели.

Таблица 1. Основные показатели пористой структуры адсорбентов

Адсорбент	Выход адсорбента от массы силикагеля, %	Объём (см <sup>3</sup> /г) сорбирующих пор продукта по парам			Суммарный объём пор по воде, см <sup>3</sup> /г	Показатель гидрофобности адсорбента*
		C <sub>6</sub> H <sub>6</sub>	CCl <sub>4</sub>	H <sub>2</sub> O		
КСК+ШР	96	0,89	0,85	0,24	0,91	3,32
КСК	95,5	0,95	0,93	0,48	1,09	1,99
АР-А	-	0,32	0,33	0,27	0,91	1,19

\*Показатель гидрофобности – отношение объема сорбирующих пор по бензолу к объёму сорбирующих пор по воде

Силикагели на основе КСК обладают высокой прочностью, равной 94%, что является их преимуществом по сравнению с углем марки АР-А. В соответствии с данными в таблице 1, наблюдается уменьшение объема сорбирующих пор зауглероженного силикагеля по воде, что свидетельствует о повышении его разделяющей способности по C<sub>6</sub>H<sub>6</sub>, CCl<sub>4</sub> и H<sub>2</sub>O и отражается в повышении показателя гидрофобности. При сравнении продукта модификации с углём АР-А выявлены превосходящие объёмы сорбирующих пор и также повышенный показатель гидрофобности. Таким образом, в равновесных условиях КСК+ШР обладает лучшими характеристиками в интересующем нас процессе, но требует испытаний в режиме поглощения веществ из потока.

Данное испытание выполнено на установке, где порция адсорбента подвешена в корзинке на пружинных весах в трубке с потоком насыщенной паровоздушной смеси удельным расходом 2 л/(мин·см<sup>2</sup>). Текущую адсорбционную ёмкость  $A$  рассчитывали как отношение увеличения массы образца, фиксируемого по удлинению пружины весов, к его начальной массе. На рисунке 1 представлена кинетика адсорбции паров бензола из насыщенного (относительное давление  $p/p_s = 1$ ) осушенного потока с использованием минерально-углеродных адсорбентов (МУА), исходного КСК и угля АР-А.

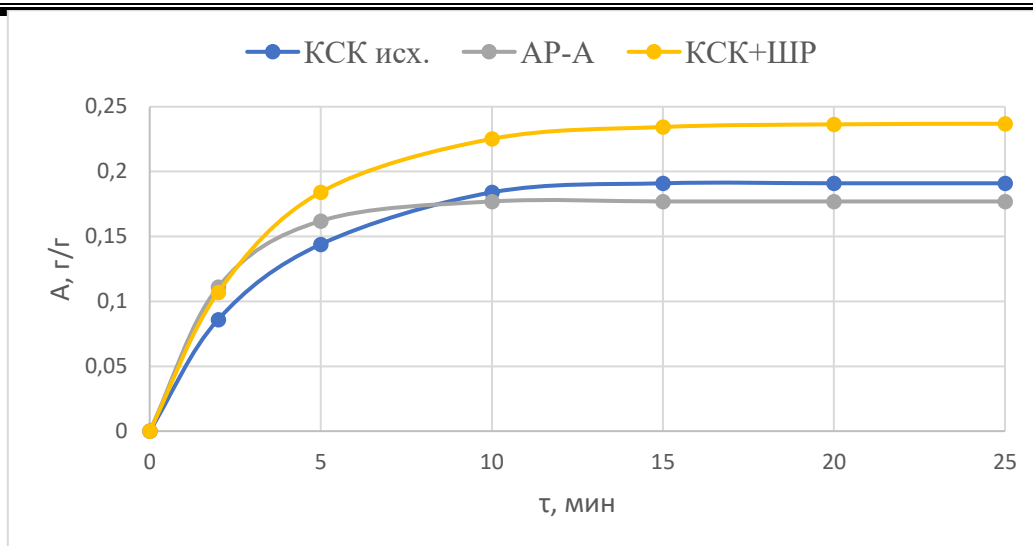


Рисунок 1. Кинетика адсорбции паров бензола адсорбентами КСК+ШР, КСК и АР-А (22 °С,  $p/p_s = 1$ )

График показывает, что адсорбент КСК+ШР имеет адсорбционную емкость на 25-30% выше, чем КСК исходный и уголь АР-А, его насыщение достигается за 15 минут. Максимальная емкость модифицированного силикагеля по бензолу составляет 0,237 г/г.

На рисунке 2 представлена кинетика адсорбции паров воды этими же адсорбентами в указанных выше условиях.

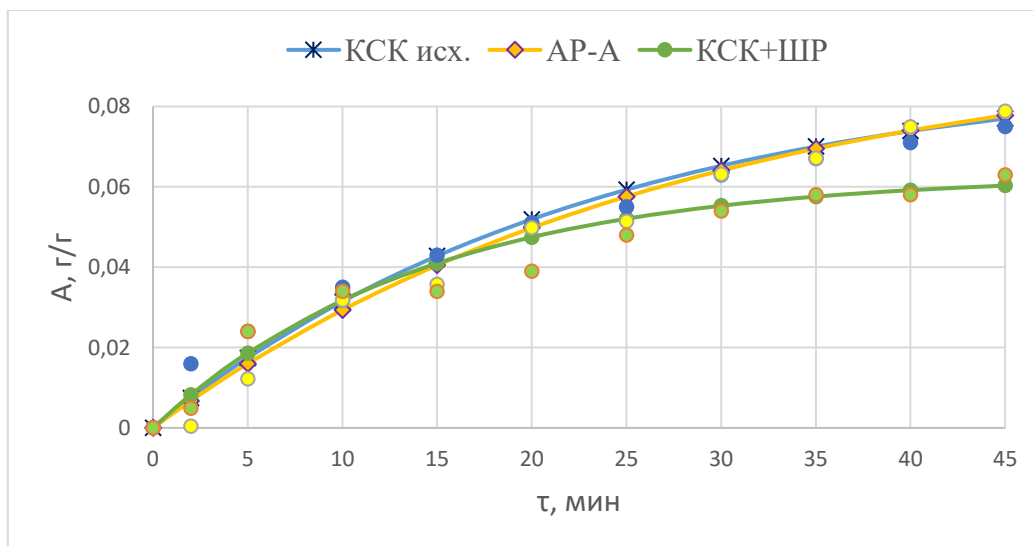


Рисунок 2. Кинетика адсорбции паров воды адсорбентами КСК+ШР, КСК и АР-А (22 °С,  $p/p_s = 1$ , влажность 100%)

По графику можно сделать вывод, что образец КСК+ШР поглощает пары воды меньше, чем КСК и АР-А, хотя и не достигает насыщения за 45 минут. Но показатель насыщения парами воды за 15 минут (0,034 г/г) меньше, чем парами бензола (0,237 г/г), что также свидетельствует о его гидрофобности и применимости в очистке влажных газов.

### *Вывод*

Проведенные исследования показывают, что использование минерально-углеродных адсорбентов на основе силикагеля КСК с измельченной шинной резиной для адсорбции паров растворителей на примере бензола является перспективным направлением. Адсорбент показал наилучшие результаты в равновесии и кинетике адсорбции паров бензола и воды по сравнению с исходным КСК и активным углём AP-A. Поглощение насыщенных паров воды им в 3,3-7,5 раз меньше, чем паров бензола, что показывает применимость термически модифицированного с резиновым отходом силикагеля в очистке влажных потоков.

### *Список литературы:*

1. Николаева Л.А., Голубчиков М.А. Адсорбционная очистка промышленных сточных вод от нефтепродуктов модифицированным карбонатным шламом. Монография. – Казань: КГЭУ, 2018 – 100 с.
2. Травень В.Ф. Органическая химия: учебное пособие для вузов. – 4-е изд., - М: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2015. – Т. 2. – 550 с.
3. СанПин 1.2.3685-21 "Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания" от 28.01.2021 №2 (с изменениями на 30 декабря 2022 года) // URL: <https://docs.cntd.ru/document/573500115> (дата обращения: 05.11.2025)
4. Тюрин А.А., Еременко Б.А., Удалова Е.А. Особенности современного состояния производства и перспективы использования бензола и этилена в качестве основного сырья для промышленного органического синтеза // Башкирский химический журнал. – 2013. – Т. 20, № 1. – С. 149-153.
5. ГОСТ 3956-76. Силикагель технический. Технические условия.
6. Нистратов А.В., Хвостова А.И. Применение минерально-углеродных адсорбентов в улавливании паров бензола // Актуальные вопросы фундаментальных и прикладных научных исследований / Сборник научных статей по материалам V Международной научно-практической конференции (25 июня 2024 г., г. Уфа). – Уфа: Изд. НИЦ, 2024. – С. 22-27.