

ПОЛУЧЕНИЕ СОРБЕНТОВ МНОГОЦЕЛЕВОГО НАЗНАЧЕНИЯ НА ОСНОВЕ ПЕРЕРАБОТКИ ЗОЛ

Е. Светкина^{1*}, А. Тарасова¹, О. Нетяга¹

¹Кафедра химии, Национальной горной университет, Днепропетровск, Украина

*Ответственный автор: e-mail svetkina.yelena@gmail.com, тел. +380562470592

MULTI-PURPOSE SORBENT PRODUCTION BY COAL ASH RECYCLING

O. Svetkina^{1*}, H. Tarasova¹, O. Netiaga¹

¹Chemistry Department, National Mining University, Dnipropetrovsk, Ukraine

*Corresponding author: e-mail svetkina.yelena@gmail.com, тел. +380562470592

ABSTRACT

Purpose. The main purpose of the work is to increase adsorption capacity of the carbon-containing sorbent.

Methods. Adsorption and filtration processes were studied with the aid of chemical and physical methods, plotting of adsorption curves and their interpretation.

Findings. The research resulted in the development of technology for obtaining effective multi-purpose sorbents on the basis of ash recycling, it also allowed to study changes in the coal structure, as well as the mechanism of wastewater purification and filtration by sorbents in conditions of thermal power plants.

Originality. It consists in the study of the sorbent surface and the sorption mechanism defined by the particular sorbent. It is shown that the structure of sorbents comprises non-localized electrons which are elements of the graphite-like carbon crystal mesh.

Practical implications. Application of the carbon-containing sorbent can improve sorption properties and, consequently, improve the degree of waste water purification and increase the filtration rate. Compared with conventional sorbents, cleaning efficiency of the carbon-containing sorbent is increased by 20 – 25% and the filtration rate has grown 2 – 3 times.

Keywords: adsorption, carbon materials, filtration, waste treatment

1. ВВЕДЕНИЕ

Углеродные сорбенты могут быть получены при высокотемпературной обработке угля и, в частности, при их сжигании. Оптимальное содержание углерода в сорбентах может быть достигнуто путем регулирования топочного процесса сжигания угля или сепарацией полученных продуктов. Основными параметрами, влияющими на содержание углерода в сорбентах, получаемых при сжигании углей, являются дисперсность пыли и коэффициент избытка воздуха. При угрублении помола угля содержание углерода в уносах растёт, равно как и с уменьшением коэффициента избытка воздуха.

Физические и физико-химические свойства углей в золах и золах уноса тесно связаны с их молекулярной структурой, которая формировалась в процессе метаморфических преобразований в угольном теле (Pokonova & Zavertkina, 2000; Yehorov, Netiaha, Lysytska & Tarasova, 2015; Svetkina, Netiaga & Tarasova, 2015).

2. ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

Органическое вещество угля неоднородно. В его состав входят битумы, гуминовые кислоты и остаточный уголь. В макромолекулах так называемых переходных форм углерода содержатся атомы углерода разных состояний гибридизации валентных электронов $\left[C_{sp^3, sp^2, sp} \right]_m$.

При рассмотрении строения остова переходных форм углерода, можно выделить два основных элемента:

1. атомномолекулярная составляющая остова – кристаллическая часть графитоподобная, состоящая из атомов углерода с sp^2 – гибридизацией;

2. атомных тип остова – неупорядоченная, аморфная составляющая, включающая в себя атомы углерода разных состояний гибридизации валентных электронов (sp^2, sp^3, nsp) .

На Рисунке 1 представлено строение остова углерода смешанного типа.

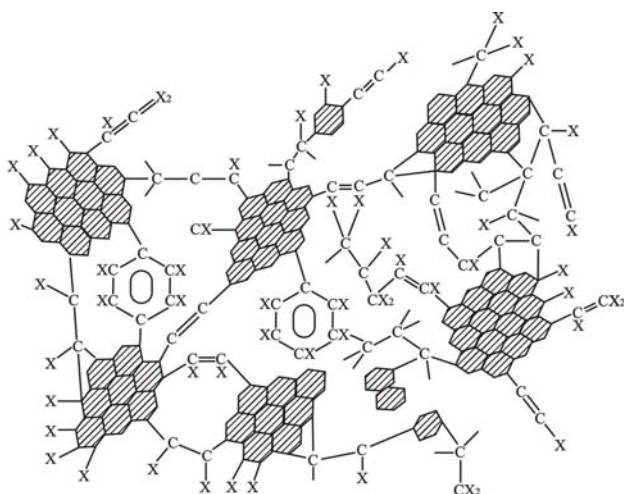


Рисунок 1. Строение остова углерода смешанного типа

Остов атомно-молекулярного строения образован из кристаллических и неупорядоченных фрагментов структур с различными типами углеродных связей химически связанных между собой и сочетающихся в пространственно-полимерной структуре.

Особенностью данной структуры является то, что эта картина сложного строения реализуется не только внутри образцов, но и на их поверхности.

Известно, что расстояние между углеродными слоями в углях составляет 0.344 нм (в отдельных случаях для хорошо проектированных углей оно достигает 0.399 нм), т.е. несколько больше межслоевого расстояния в графите (0.335 нм). Приведенные цифры позволяют судить о более слабом взаимодействии между углеродными слоями в активных углях по сравнению с графитом. В настоящее время существует единое мнение, что взаимодействие между углеродными слоями в кристаллитах угля осуществляется за счет проявления Ван дер Ваальсовых сил взаимодействия (Egorov, Svetkina, Tarasova & Netyaga, 2015).

Таким образом, из приведенного выше рассмотрения молекулярной структуры углей вытекает, что элементом трехмерной структуры активного угля является графитоподобный кристаллит, который для неактивированных образцов в идеальном случае имеет цилиндрическую форму с соотношением диаметра оснований и высоты, равным 2:1, и площадью поверхности около 13 нм². При рассмотрении такого кристаллита обращает на себя внимание наличие двух типов поверхности, один из которых образован графитоподобными углеродными сетками (основание цилиндра), а другой – краевыми атомами, расположенными по периферии углеродных сеток (образующая поверхность цилиндра). Уже само это обстоятельство является причиной существования по крайней мере двух типов неоднородности адсорбирующей поверхности активных углей.

Пористая структура включает в себя характеристику свободного пространства в объеме углеродных тел, которое образуется в результате воздействия

окисляющих реагентов на углеродное вещество при повышенных температурах. Наиболее обширные и систематические, теоретические и экспериментальные исследования в этой области принадлежат М.М. Дубинину. Макропоры активного угля имеют радиусы кривизны поверхности 100–200 нм, их удельная поверхность составляет 0.5–2.0 м²/г, объем – 0.2–0.5 см³/г. Для мезопор перечисленные величины имеют соответственно такие значения: 2–100 нм, 20–70 м²/г и 0.1–0.8 см³/г.

Наиболее мелкую разновидность пор углеродных адсорбентов целесообразно подразделять на микропоры, для которых характеристические размеры в направлении, нормальном к перемещению молекул при их заполнении, составляют менее 0.6–0.7 нм и супермикропоры, для которых указанные размеры заключены в интервале 0.6–1.6 нм.

Суммарный объем микропор обычно находится в интервале 0.2–0.6 см³/г. Давно известно, что микропоры активного угля представляют собой не случайные промежутки между беспорядочно уложенными кристаллитами, а свободные объемы в его молекулярной структуре, возникающие при выгорании углеродистого вещества. Микропоры с более регулярной структурой образуются при частичном или полном сгорании слоев углерода кристаллитов, причем преимущественно выгорают менее совершенные кристаллиты малых размеров. В результате образуются щелевидные микропоры в пределе между круглыми снованиями (стенками), отвечающими форме кристаллитов углерода. Параметрами такой идеализированной модели микропор являются радиус круглого основания и полуширина плоской щели (Dubinin, 1981; Rostrup-Nielsen, 2000).

Поверхностные химические соединения активных углей не представляют собой новой фазы на угле, а являются функциональными группами той или иной природы, связанными с периферическими атомами углерода в графитоподобных сетках кристаллитов угля. Несмотря на большое число работ, посвященных химии поверхности угля, вопрос о природе поверхностных химических соединений активных углей можно считать одним из наиболее сложных и наименее выясненных. В связи с этим следует отметить, что большинство исследователей связывают как кислотно-основные, так и окислительно-восстановительные свойства активных углей с существованием на них определенных функциональных групп различной природы. Поскольку при изучении химической природы поверхностных соединений угля прибегали к исследованию их сорбционной способности в отношении кислоты и щелочи, было введено представление об основных и кислотных оксидах на поверхности угля. Учитывая, что количество хемосорбированного углем кислорода всегда превышает его содержание в основных или кислотных группах, для объяснения этого несоответствия было введено представление о неионогенных поверхностных соединениях кислорода.

Если уголь после активирования приходит в соприкосновение с кислородом или воздухом при невысокой температуре, например 0–100°C, то на угле

образуются поверхностные соединения основного характера. Хотя природа основных оксидов все еще остается недостаточно выясненной, установлено, что основные оксиды являются продуктами хемосорбции кислорода на угле, которым соответствуют высокие значения энергии адсорбции кислорода на более активных участках поверхности угля. Кислород этих оксидов при соприкосновении с водой или водными растворами переходит в раствор в виде гидроксильных ионов, заряжая поверхность угля положительно.

При температурах 400 – 500°C взаимодействие кислорода с углем происходит иначе. В этом случае уголь хемосорбирует 13 – 15%, а по некоторым данным до 22 – 25% кислорода, который прочно связывается углем в форме различных поверхностных кислородсодержащих соединений. Примерно 1/5 часть хемосорбируемого в этих условиях кислорода входит в состав различных протогенных групп.

Цель работы является повышение адсорбционной емкости углеродосодержащего сорбента.

Особенности пористой и молекулярной структуры активного угля, его электрофизических свойств, химической природы поверхности способствует тому, что растворенные вещества на углеродном адсорбенте могут поглощаться по совершенно различным механизмам, их сорбция обуславливается различной природой сил, участвующих в процессе поглощения.

Так, растворенные вещества поглощаются на угле в виде целых молекул за счет высокой удельной поверхности и особого характера пористости – проявление вандерваальсовых сил взаимодействия; по механизму ионного обмена, определяемого химической природой поверхности угля; путем образования поверхностных комплексов донорноакцепторного типа и восстановления адсорбируемых веществ, что определяется электронным состоянием угля.

Для изучения механизма взаимодействия растворенных веществ с активным углем мы воспользовались методом перемены газовой атмосферы. Этот метод основан на способности платинированного угля перезаряжаться при перемене газовой атмосферы и менять в связи с этим свое адсорбционное поведение по отношению к растворенным электролитам. В атмосфере воздуха (кислорода) платинированный уголь адсорбирует из растворов электролитов анионы. Наоборот, в водороде уголь перезаряжается и приобретает способность поглощать из растворов катионы.

Для выяснения механизма сорбции растворенных веществ с помощью этого метода адсорбционные опыты проводят параллельно в атмосфере воздуха и в водороде. Если адсорбция осуществляется путем обмена ионов, то в зависимости от знака их заряда они должны поглощаться в атмосфере только одного какого-то газа (анионы – в атмосфере воздуха, катионы – в водороде). На адсорбцию чисто молекулярного типа перемена газовой атмосферы не оказывает практически никакого влияния. В случае специфической сорбции (донорноакцепторного взаимодействия) величина ее в одной из атмосфер должна соответственно понизиться или повыситься.

Этот прием был использован в нашей работе для выяснения механизма сорбции большого числа орга-

нических и неорганических соединений активным углем в зависимости от их химического, электронного строения, способности к диссоциации, константы нестойкости (для комплексных соединений) и т.д.

Механизм сорбции кислот активным углем известен в литературе. Что касается сорбции слабо диссоциированных органических кислот, то обычно считают, что они поглощаются углем в виде целых молекул. Правда, имеются отдельные, очень немногочисленные указания на то, что адсорбция не полностью диссоциированных кислот активным углем может происходить по смешанному, молекулярно-ионному (или, в зависимости от степени диссоциации адсорбтива, ионно-молекулярному) механизму. Впервые методом перемены газовой атмосферы установили, что адсорбция бензойной кислоты происходит по молекулярному механизму.

Проведенные нами исследования по адсорбции ряда поверхностно-активных органических кислот на активном платинированном угле обнаружили, что распространенное мнение о чисто молекулярном характере поглощения слабых органических кислот углем является во многих случаях необоснованным. Исследования по адсорбции одно- и двухосновных кислот жирного ряда) показали, что полное совпадение изотерм сорбции в атмосфере воздуха и в водороде на платинированном угле, указывающие на молекулярный механизм поглощения, наблюдается только у таких представителей названных рядов, как капроновая и масляная, с одной стороны, адипиновая и глутаровая – с другой, обладающих сравнительно длинной углеродной цепочкой. Что же касается первых членов этих рядов – муравьиной и уксусной и особенно щавелевой и малоновой, то изотермы адсорбции этих кислот в водороде проходят, прежде всего, в области наиболее разбавленных растворов ниже, чем в атмосфере воздуха, что говорит о значительной доле сорбции этих кислот в виде ионов. Поскольку константы диссоциации одно- и двухосновных жирных кислот имеют в пределах данного гомологического ряда довольно близкие значения, различия в механизме их сорбции весьма незначительны.

Последовательное введение атомов галогенов в молекулу жирной кислоты обычно сильно увеличивает ее диссоциацию. Учитывая это, можно ожидать, что при такого рода замещениях должна возрасти и доля ионного обмена в общей величине сорбции кислот углем. Хотя все три исследованные нами кислоты – уксусная, монохлоруксусная и трихлоруксусная – поглощаются углем по смешанному механизму, удельный вес ионного обмена в их сорбции далеко не одинаков. В то время как у слабо диссоциированной уксусной кислоты небольшой объем анионов наблюдается только в достаточно разведенных растворах, у монохлоруксусной и особенно трихлоруксусной кислоты он проявляется гораздо сильнее, причем во всем исследованном нами интервале концентраций.

Из сопоставленных данных по сорбции пропионовой и молочной кислот видно, что введение ОН-группы в радикал пропионовой кислоты, т.е. замена пропионовой кислоты оксипропионовой (молочной) значительно уменьшает общую величину

сорбции, изотермы адсорбции в обеих атмосферах имеют примерно один и тот же вид. Янтарная кислота поглощается на угле лучше, чем оксиянтарная (винная) кислота, более того, если первая поглощается почти исключительно в виде молекул, то винная кислота сорбируется из наиболее разбавленных растворов более чем на половину за счет ионного обмена.

Аналогичное влияние заместителей наблюдалось и при адсорбции ароматических соединений. Слабо диссоциированные, но зато хорошо адсорбируемые углем ароматические кислоты – бензойная, фталевая, фенол поглощаются углем, как это следует из прак-

тически полного совпадения изотерм их сорбции в атмосфере воздуха и в водороде, по молекулярному механизму. Введение ОН-группы в молекулу бензойной кислоты (салициловая кислота) уменьшает общую величину сорбции. Последующее замещение одного из атомов водорода в салициловой кислоте сильно диссоциирующей сульфогруппой уже не только резко снижает адсорбируемость кислоты углем, но и оказывает заметное влияние на сам характер ее поглощения, уже молекулярно-ионный. По аналогично смешанному механизму происходит и адсорбция сульфаниловой кислоты (Табл. 1).

Таблица 1. Адсорбция сульфосалициловой и сульфаниловой кислот платинированным углем

Концентрация C_o , ммоль/л	Кислородный уголь		Водородный уголь	
	Концентрация C_p , ммоль/л	Количество адсорбированного вещества a , моль/г	Концентрация C_p , ммоль/л	Количество адсорбированного вещества a , моль/г
Сульфосалициловая кислота				
5.00	0.88	0.412	1.62	0.338
10.00	3.82	0.618	5.59	0.441
20.00	12.50	0.750	14.34	0.566
Сульфаниловая кислота				
5.00	1.40	0.360	3.12	0.188
10.00	5.03	0.497	6.91	0.309
20.00	13.04	0.596	15.10	0.490
50.00	41.25	0.874	42.57	0.743

Однако, несмотря на то, что у слабодиссоциированных и хорошо адсорбируемых углем органических кислот изотермы адсорбции в атмосфере воздуха и в водороде полностью совпадают, с точки зрения вандерваальсовых взаимодействий нельзя объяснить многие особенности их поглощения на угле. Причиной изменения величин поглощения в ряде случаев является наличие в адсорбируемой молекуле функциональных групп, способных повлиять на распределение электронной плотности вследствие образования более или менее устойчивых молекулярных комплексов с переносом заряда. Например, при введении электронодонорной более основной группировки -ОН в молекулу кислоты ее адсорбция падает. Так, бензойная кислота сорбируется лучше, чем салициловая, янтарная больше, чем оксиянтарная, пропионовая лучше, чем оксипропионовая. Причем введение электронодонорной группы в молекулу алифатической кислоты оказывает гораздо более существенное влияние на сорбцию, чем ароматическое соединение, где электроноакцепторное бензольное кольцо нивелирует в определенной степени это различие.

Таким образом, изучен механизм действия углеродных сорбентов. Выявлено, что адсорбция происходит благодаря донорно-акцепторному взаимодействию, а аполярных ПАВ – вследствие образования прочных структур, иммобилизирующих реагенты-загрязнители воды.

Для получения сорбента каменноугольного сырья подвергали угрубленному вибропомолу до размера частиц 10 – 500 мкм при содержании грубой фракции –90 мкм 10 – 70% и сжигали в котлоагрегатах тепловых электростанций (ТЭС) при 1200 – 1500°C. В результате такой обработки каменноугольного

сырья при указанном температурном режиме в увеличивается выход сорбента и получаемый продукт на 45 – 60% состоит из углеродсодержащей фракции и на 20 – 55% – из частичек силикатов шаровидной формы.

Минеральная составляющая сорбента состоит из частиц алюмосиликатов шаровидной формы, наличие которых позволяет увеличить скорость фильтрования очищаемых вод через слой сорбента, а также повысить эффективность их очистки. Наличие в составе фильтрующей смеси частичек угля и алюмосиликатов, обладающих различными гидрофобными свойствами, увеличивает сорбционную способность фильтра.

Сочетание указанных свойств у сорбента делает его особенно эффективным при очистке сточных вод от вязких нефтепродуктов. При перемешивании сорбента со сточными водами, загрязненными, например, мазутом и вязкими машинными маслами, происходит масляная агломерация, т.е. образование агломератов типа гранул размером 1 – 5 мм, состоящих из частиц сорбента.

Масляная агломерация происходит при определенном значении pH раствора, которое достигается в растворе при использовании сорбента, в состав которого входят оксиды щелочных и щелочноземельных металлов в указанных количествах и соотношениях (Табл. 2).

Выбор гранулометрического состава исходного сырья для получения сорбента по предлагаемому способу определяется маркой угля. Угли марки АШ и, частично, тощие угли должны применяться с содержанием фракции –90 мкм 10 – 40%, а угли с более низкой степенью метаморфизма, например марки Г и Ж, надо использовать более грубого помола: содержание фракции –90 мкм 50 – 70%.

Таблица 2. Содержание компонентов, %

Продукт	SiO ₂	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₄	Al ₂ O ₃	TiO ₂	P ₂ O ₅	K ₂ O	Na ₂ O	C
Сорбент	22.57	5.62	0.99	0.50	0.20	7.67	0.25	0.41	1.40	0.30	60.00
Зола	49.66	12.32	2.18	1.27	0.44	12.87	0.53	0.98	3.10	0.67	12.00

Удельная поверхность сорбента (зола), получаемого по известному способу из различных марок угля составляет 1.1 – 5.9 м/г. Удельная поверхность сорбента в предложенном способе превосходит эту величину как в результате роста содержания угольной фракции, так и пористости угольных частиц. Она

равняется 20 – 30 м/г для разных фракций угля с тенденцией увеличения для углей с низкой степенью метаморфизма (марки Г и Ж).

Сравнительные данные по скорости фильтрования и степени очистки от керосина приведены в Таблице 3.

Таблица 3. Очистка воды от керосина

Содержание масс компонентов, %		Содержание керосина в воде, мг/л		Степень очистки, %
угольная фракция	алюмосиликаты	до фильтрации	после фильтрации	
25	75	17.2	4.1	76.3
35	65	16.4	2.0	87.3
45	55	15.8	0.9	94.3
55	45	19.5	0.5	97.4
65	35	18.9	0.4	97.8
76	25	15.2	0.3	98.2
85	15	16.7	0.3	98.2

Таким образом, применение предлагаемого способа получения углеродсодержащего сорбента позволяет улучшить его сорбционные свойства и, как следствие, повысить степень очистки сточных вод и увеличить скорость фильтрования. По сравнению с известными сорбентами эффективность очистки увеличивается на 20 – 25%, а скорость фильтрования в 2 – 3 раза. Кроме того, способ позволяет удешевить фильтрующую смесь, увеличить выход сорбента и расширить базу сорбционных материалов.

3. ВЫВОДЫ

1. Выявлено, что при высокотемпературной обработке углей могут быть получены сорбенты многоцелевого назначения.

2. Установлено, что наиболее эффективные сорбенты небольшой стоимостью могут быть произведена в условиях ТЭС при специальном сжигании углей определенных марок.

3. Выявлено, что механизм адсорбции включает донорно-акцепторное взаимодействие, в результате которого происходит образования прочных структур, иммобилизирующих реагенты-загрязнители воды.

БЛАГОДАРНОСТЬ

Авторы выражают глубокую благодарность сотрудникам кафедры химии и в особенности ее профессору П.А. Егорову за ценную помощь в проведении экспериментальных исследований.

REFERENCES

- Dubinina, M. (1981). Adsorbtsiya parov vody i mikroporistaya struktura uglerodnykh adsorbentov. *Izvestiya AN SSSR, Seriya Khimiya*, (1), 9-21.
- Egorov, P., Svetkina, E., Tarasova, A., & Netyaga, O. (2015). Pererabotka otkhodov TES, rabotayushchikh na ugle. *Rozrobka Rodovysch*, 453-460.
- Pokonova, Y., & Zavertkina, L. (2000). Uglerodnyye adsorbenty iz produktov pererabotki goryuchikh iskopayemykh. *Khimiya Tverdogo Topliva*, (5), 47-54.
- Rostrup-Nielsen, J. R. (2000). New aspects of syngas production and use. *Catalysis today*, 63(2), 159-164. [http://dx.doi.org/10.1016/S0920-5861\(00\)00455-7](http://dx.doi.org/10.1016/S0920-5861(00)00455-7)
- Svetkina, O., Netyaga, O., & Tarasova, H. (2015). Sorbents of purify mine waters. *New Developments in Mining Engineering 2015: Theoretical and Practical Solutions of Mineral Resources Mining*, 111-117. <http://dx.doi.org/10.1201/b19901-21>
- Yehorov, P., Netyaha, O., Lysytska, S., & Tarasova, A. (2015). Khimichni osnovy ta ekolohichni problemy vykorystannia vtorynnoho resursu – zolnykh vidkhodiv TES. In *Forum hirnykiv* (pp. 199-204). Dnipropetrovsk: Natsionalnyi hirnychiy universytet.

ABSTRACT (IN RUSSIAN)

Цель. Целью работы является повышение адсорбционной емкости углеродсодержащего сорбента.

Методика. Исследование процессов адсорбции и фильтрования изучались с помощью химических и физико-химических методов, построения адсорбционных кривых и их обработки.

Результаты. Разработана технология получения эффективных сорбентов многоцелевого назначения на основе переработки зол, изучено изменение структуры угля, а также механизм очистки и фильтрования сточных вод при применении сорбентов, изготовленных в условиях тепловых электростанций.

Научная новизна. Состоит в изучении поверхности сорбента, механизма сорбции данным сорбентом. Показано, что в структуре сорбентов есть нелокализованные электроны, которые входят в состав графитоподобных сеток кристаллов углерода.

Практическая значимость. Применение предлагаемого углеродсодержащего сорбента позволяет улучшить сорбционные свойства и, как следствие, повысить степень очистки сточных вод, а также увеличить скорость фильтрования. По сравнению с известными сорбентами эффективность очистки увеличивается на 20 – 25%, а скорость фильтрования – в 2 – 3 раза.

Ключевые слова: адсорбция, углеродсодержащие продукты, фильтрование, сорбент, очистка сточных вод

ABSTRACT (IN UKRAINIAN)

Мета. Метою роботи є підвищення адсорбційної ємності сорбенту, що містить вуглець.

Методика. Дослідження процесів адсорбції й фільтрування вивчалися за допомогою хімічних і фізико-хімічних методів, побудови адсорбційних кривих та їх обробки.

Результати. Розроблено технологію отримання ефективних сорбентів багатоцільового призначення на основі переробки зол, вивчено зміну структури вугілля, а також механізм очищення та фільтрування стічних вод при застосуванні сорбентів, виготовлених в умовах теплових електростанцій.

Наукова новизна. Полягає у вивченні поверхні сорбенту, механізму сорбції даними сорбентом. Показано, що у структурі сорбентів присутні нелокалізовані електрони, які входять до складу графитоподібних сіток кристалів вуглецю.

Практична значимість. Застосування запропонованого сорбенту, що містить вуглець, дозволяє поліпшити сорбційні властивості та, як наслідок, підвищити ступінь очищення стічних вод, а також збільшити швидкість фільтрування. У порівнянні з відомими сорбентами ефективність очищення збільшується на 20 – 25%, а швидкість фільтрування – у 2 – 3 рази.

Ключові слова: адсорбція, продукти, що містять вуглець, фільтрування, сорбент, очищення стічних вод

ARTICLE INFO

Received: 21 December 2015

Accepted: 9 February 2016

Available online: 30 March 2016

ABOUT AUTHORS

Olena Svetkina, Doctor of Technical Sciences, Head of the Chemistry Department, National Mining University, Dnipropetrovsk, 19 Yavornytskoho Ave., 2/44, 49005, Dnipropetrovsk, Ukraine. E-mail: svetkina.yelena@gmail.com

Hanna Tarasova, Assistant Professor of the Chemistry Department, National Mining University, Dnipropetrovsk, 19 Yavornytskoho Ave., 19, 2/44, 49005, Dnipropetrovsk, Ukraine. E-mail: ann31b20@gmail.com

Olga Netiaga, Senior Lecturer of the Chemistry Department, National Mining University, Dnipropetrovsk, 19 Yavornytskoho Ave., 2/44, 49005, Dnipropetrovsk, Ukraine. E-mail: olga.netiaga@gmail.com