

УДК 661.183

Т. А. САВИЦКАЯ¹, Т. Н. НЕВАР¹, Н. Г. ЦЫГАНКОВА¹,
М. Г. КРИВОВА¹, И. В. РЕЗНИКОВ¹, Е. А. ШАХНО¹,
А. И. ВЕЗЕНЦЕВ², Д. Д. ГРИНШПАН¹

СОРБЕНТЫ НА ОСНОВЕ АКТИВИРОВАННОГО УГЛЯ И ГИДРОЛИЗНОГО ЛИГНИНА: СТРУКТУРА, СВОЙСТВА, ПРИМЕНЕНИЕ

¹НИИ физико-химических проблем

Белорусского государственного университета, Минск, Беларусь

²Белгородский национальный исследовательский университет,
Белгород, Россия

Изучены физико-химические свойства сорбентов на основе модифицированных активированных углей и гидролизного лигнина. Показано, что активность сорбентов в процессах очистки воды определяется морфологическими особенностями их поверхности и характеристиками поровой структуры. Так, активированные угли благодаря развитой внутренней поверхности эффективны для извлечения органических загрязнителей из их водных растворов. Для удаления не смешивающихся с водой органических жидкостей предпочтительнее использование крупнопористого гидрофобного сорбента «Лигносорб» на основе гидролизного лигнина, позволяющего получать твердый монолитный продукт при смешивании с жидкой фазой.

Physical and chemical properties of sorbent based on activated carbons and hydrolyzed lignin have been studied. It has been shown that activity of sorbents in water treatment processes is determined by their morphological characteristics of the surface and pore structure. Thus, activated carbons due to the developed inner surface are effective for the extraction of organic pollutants from aqueous solution. To remove water-immiscible contaminants macroporous hydrophobic sorbents with complex texture, such as «Lignosorb» sorbent based on hydrolytic lignin, are preferred.

Ключевые слова: активированный уголь; гидролизный лигнин; органические загрязнители; поровая структура; адсорбция.

Keywords: activated carbon; lignin sorbent; organic pollutions; pore structure; adsorbtion.

Сорбционные методы очистки воды от органических загрязнителей традиционно предполагают использование активированных углей (АУ) как неспецифических сорбентов, способных удалять истинно растворенные и тонкоэмульгированные соединения органической природы [1, 2]. Для удаления не смешивающихся с водой диспергированных или наслоенных органических загрязнителей, например нефтепродуктов, АУ используются значительно реже. Одним из сорбентов, способных эффективно удалять нефть с зеркала воды, является гидролизный лигнин [3].

Цель настоящей работы заключалась в проведении систематического исследования влияния структуры, физико- и коллоидно-химических свойств АУ, поверхностно модифицированных целлюлозным полиэлектролитом, и гидрофобизованного гидролизного лигнина на их сорбционную активность в процессах очистки воды. Актуальность разработки, направленной на создание эффективных сорбентов, обусловлена тем, что в Республике Беларусь отсутствует промышленное производство подобных материалов, несмотря на их востребованность в различных отраслях народного хозяйства, начиная с городских станций водоочистки и заканчивая фармацевтическими предприятиями, изготавливающими лекарства.

МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

В качестве углеродных сорбентов использовали порошок древесный уголь ОУ-А (ОАО «Сорбент», г. Пермь), волокнистый АУТ-МИ (ОАО «СветлогорскХимволокно», г. Светлогорск), терморасширенный графит (ЗАО «Ливсор», г. Минск), углеродные нанотрубки (Arkema, Франция) и оксид графена (предоставлен Корейским исследовательским институтом бионауки и биотехнологии, г. Даеджеон). Модификацию АУ проводили путем диспергирования в водном растворе производного целлюлозы – сульфата ацетата в форме натриевой соли (САЦ) с последующей сушкой при 60 ± 5 °С.

Лигниновый сорбент «Лигносорб» (ТУ ВУ 100050710.122-2009) был получен на ОАО «Бобруйский завод биотехнологий» путем температурной обработки гидролизного лигнина.

Микрофотографии получали на электронном микроскопе сканирующего типа LEO 1420-SEM 240. Дисперсный состав порошковых сорбентов определяли на лазерном анализаторе дисперсности Mastersizer 3000 с модулем жидкостного (Hydro MV) диспергирования.

Удельную поверхность и поровую структуру адсорбентов оценивали методом низкотемпературной адсорбции азота на автоматизированной адсорбционной установке ASAP 2020 (Micromeritics, США).

Для исследования адсорбционной активности сорбентов в водных растворах использовали традиционные маркеры: иод (I_2), краситель метиленовый голубой (МГ), цианокобаламин (витамин B_{12}), а также цефтриаксон (антибиотик цефалоспоринового ряда) и поверхностно-активные вещества (ПАВ) различной природы. Сорбцию проводили в статических условиях из водных растворов при периодическом встряхивании.

Для определения величины сорбции нефтепродуктов был использован модифицированный метод ASTM [4].

Реологические исследования проводили на реометре Brookfield (США) при температуре 298 ± 1 К, как описано в [5].

Для термического анализа образцов использовали синхронный термический анализатор STA 449 Jupiter производства фирмы NETZSCH (Бавария).

Теплоту сгорания композиционного топлива измеряли в бомбовом изо-периболлическом калориметре В-08МА с изотермической водяной оболочкой по ГОСТ 147.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Как видно из рис. 1, *а*, волокнистый угольный сорбент АУТ-МИ представляет собой смесь микроволокон длиной от 10 до 80 мкм и диаметром ~8 мкм с бобовидным поперечным срезом, характерным для прекурсора – вискозного гидратцеллюлозного волокна.

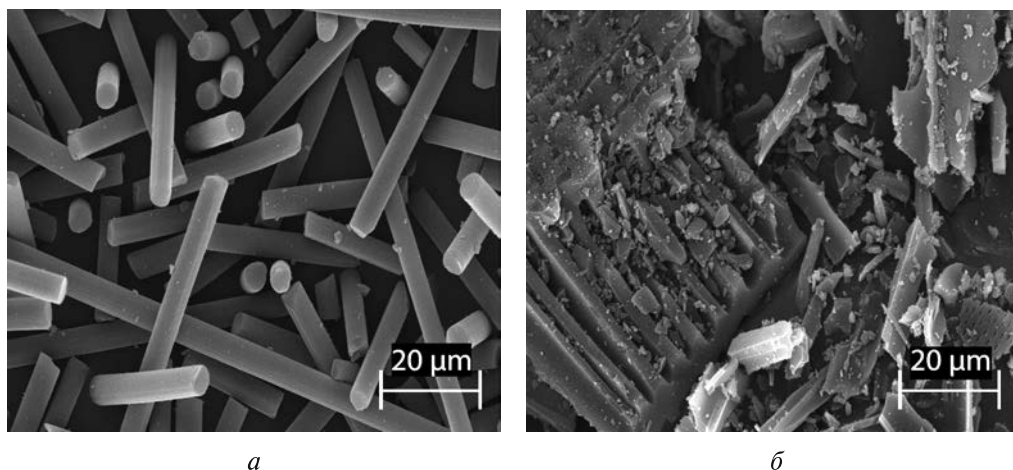


Рис. 1. СЭМ изображение поверхности частиц углеродных сорбентов:
а – волокнистый АУТ-МИ; *б* – древесный ОУ-А

Порошковый древесный уголь ОУ-А в отличие от АУТ-МИ менее однороден по своему дисперсному и морфологическому составу и содержит частицы неправильной формы размером порядка 1 мкм, ромбоэдрические осколки длиной до 40 мкм (рис. 1, *б*), а также фрагменты, напоминающие по форме и строению капиллярную структуру исходной древесины. Модификация (гидрофилизация) поверхности АУ целлюлозным полиэлектролитом оказывает влияние на характер распределения частиц по размерам в водной среде: оно становится более узким (рис. 2), а сами суспензии более устойчивыми.

Вид изотерм адсорбции азота (рис. 3) указывает на присутствие в структуре углей АУТ-МИ и ОУ-А пор различной формы и размера. Выпуклые линии изотерм свидетельствуют о наличии мелких пор. Крутой рост адсорбции в области низких значений относительных давлений указывает на наличие значительного количества микропор, а появление петель гистерезиса, относящихся по форме к типу В [6], указывает, что большинство мезопор имеют щелевидную форму.

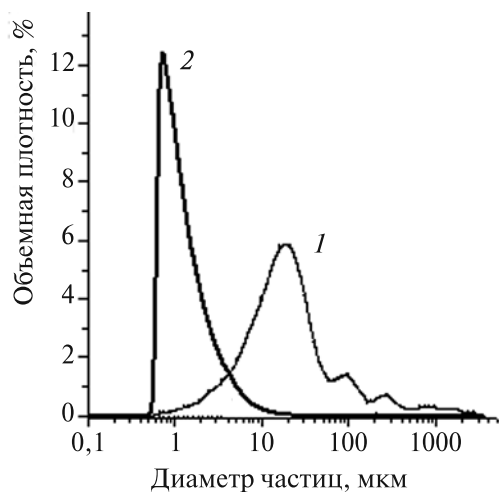


Рис. 2. Распределение частиц по размерам для углеродных сорбентов: 1 – ОУ-А; 2 – ОУ-А + САЦ

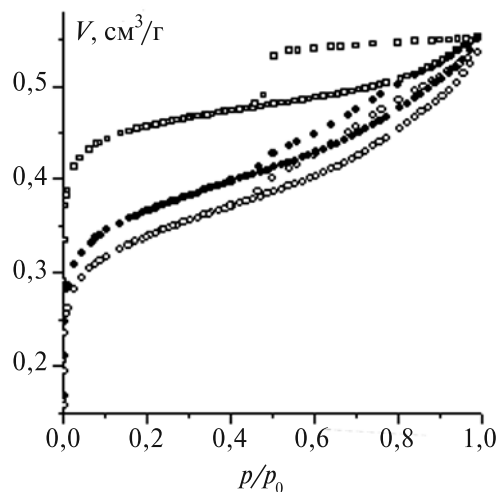


Рис. 3. Изотермы низкотемпературной адсорбции-десорбции азота на АУ: 1 – АУТ-МИ; 2 – ОУ-А; 3 – ОУ-А + САЦ

Как видно из табл. 1, при практически одинаковом общем объеме пор ($V_{\text{общ}}$) АУТ-МИ характеризуется более высокими значениями объема микропор и их удельной поверхности, чем ОУ-А. ОУ-А, который содержит такие же по размеру микропоры, как и АУТ-МИ, является более мезопористым углем.

Модификация углей целлюлозным полиэлектролитом не приводит к существенному изменению характера адсорбции газообразного N_2 , о чем свидетельствуют кривые 2 и 3 (рис. 3), и лишь незначительно снижает адсорбционно-структурные параметры (табл. 1). В то же время площадь внешней поверхности, рассчитанная с помощью метода лазерной дифракции, для диспергированного в водной среде модифицированного ОУ-А составляет $\sim 710 \text{ м}^2/\text{кг}$, что выше в 1,4 раза аналогичной величины для исходного угля.

Таблица 1

Основные характеристики поровой структуры АУ

АУ	$S_{\text{уд}}, \text{ м}^2/\text{г}$	Объем пор, $\text{см}^3/\text{г}$			Удельная поверхность пор, $\text{м}^2/\text{г}$		Характеристики микропор	
		$V_{\text{микро}}$	$V_{\text{мезо}}$	$V_{\text{общ}}$	$S_{\text{микро}}$	$S_{\text{внеш}}$	$d_{\text{микро}}, \text{ нм}$	$W_m, \text{ см}^3/\text{г}$
АУТ-МИ	920	0,38	0,18	0,56	740	180	0,63	0,46
АУТ-МИ + САЦ	860	0,36	0,16	0,52	700	160	0,62	0,42
ОУ-А	750	0,24	0,31	0,55	460	290	0,67	0,38
ОУ-А + САЦ	690	0,21	0,30	0,51	410	280	0,66	0,35

W_m – предельный объем адсорбционного пространства микропор.

Результаты адсорбции из растворов маркеров, имеющих различные линейные размеры, представлены в табл. 2.

Таблица 2

Адсорбционная активность АУ по отношению к веществам-маркерам, имеющим различные линейные размеры

Угольный сорбент	Предельная гиббсовская адсорбция Γ_{∞} , ммоль/г		
	I_2 ($0,53 \times 0,27 \times 0,27$ нм)*	МГ ($1,38 \times 0,57 \times 0,40$ нм)	Витамин B_{12} ($\sim 5,0 \times 5,0 \times 5,0$ нм)
АУТ-МИ	$4,33 \pm 0,08$	$0,86 \pm 0,03$	$0,022 \pm 0,004$
АУТ-МИ + САЦ	$4,05 \pm 0,08$	$1,53 \pm 0,03$	$0,016 \pm 0,004$
ОУ-А	$3,58 \pm 0,08$	$0,80 \pm 0,03$	$0,044 \pm 0,004$
ОУ-А + САЦ	$3,35 \pm 0,08$	$1,42 \pm 0,03$	$0,030 \pm 0,004$

*Указаны линейные размеры молекул калибраторов.

Как следует из данных табл. 2, иод лучше адсорбируется на микропористом АУТ-МИ. МГ хорошо адсорбируется обоими углями, несмотря на то что его молекулярные размеры больше соответствуют размеру мезопор. Это связано с тем, что в водных растворах МГ, по данным УФ-спектроскопии, находится в основном в димеризованной форме, которая равновесна с мономерной. При этом мономерная форма может адсорбироваться в микропорах, что и происходит в случае АУТ-МИ, а адсорбция димерных молекул МГ протекает преимущественно в мезопорах ОУ-А. Увеличение адсорбции МГ на модифицированных углях обусловлено дополнительными электростатическими и гидрофобными взаимодействиями красителя и полимера.

Цефтриаксон, размеры молекулы которого ($2,0 \times 0,8 \times 0,5$ нм) сопоставимы с размерами мезопор, лучше адсорбируется на ОУ-А ($\Gamma_{\infty} = 0,36$ ммоль/г), чем на АУТ-МИ ($\Gamma_{\infty} = 0,13$ ммоль/г), несмотря на тот факт, что удельная поверхность АУТ-МИ в 1,2 раза больше, чем ОУ-А. Это еще раз свидетельствует о том, что адсорбция исследованных веществ на АУ происходит преимущественно не на поверхности частиц, а в порах. При адсорбции витамина B_{12} проявляется молекулярно-ситовый эффект и уголь ОУ-А, как более крупнопористый, характеризуется не только более высокими значениями адсорбции витамина B_{12} , но и большей скоростью адсорбции.

Показано, что все исследованные АУ являются эффективными сорбентами и для извлечения дифильных молекул ПАВ из их водных растворов. Величины гиббсовской адсорбции ПАВ различной природы представлены в табл. 3, из данных которой видно, что наибольшее значение адсорбции катионных ПАВ характерно для АУТ-МИ. В то же время для адсорбции анионных и неионных ПАВ предпочтительнее использование древесного ОУ-А, наибольшее средство

которого к этим ПАВ подтверждают и термодинамические характеристики адсорбции – изменение изобарно-изотермического потенциала и константа адсорбционного равновесия. Например, для анионного ПАВ они соответственно составляют $-19,6$ кДж/моль и $3,88 \times 10^{-3}$ для ОУ-А и $-14,4$ кДж/моль и $0,34 \times 10^{-3}$ для АУТ-МИ.

Таблица 3

Адсорбция ПАВ различной природы на АУ

Образец ПАВ	Молекулярная масса ПАВ, г/моль	Предельная гиббсовская адсорбция ПАВ на угле, Γ_{∞} , ммоль/г	
		ОУ-А	АУТ-МИ
Катионные ПАВ			
Додецилтриметиламмоний бромид $C_{12}H_{25}(CH_3)_3N^+Br^-$	308,3	$0,59 \pm 0,03$	$0,67 \pm 0,04$
Анионные ПАВ			
Доцелилсульфат натрия (ДСН) $C_{12}H_{25}SO_4Na$	288,4	$0,88 \pm 0,01$	$0,60 \pm 0,01$
Неионогенные ПАВ			
Октилфенилполиэтоксиэтанол $C_8H_{17}C_6H_4O(C_2H_4O)_{10}H$	646,9	$0,71 \pm 0,01$	$0,55 \pm 0,02$

Методом молекулярной механики Molecular Mechanics MM⁺ было показано, что адсорбция ПАВ в объеме микропоры, в качестве модели которой была взята углеродная трубка диаметром 1 нм (рис. 4), оказалась в 2,5 раза более энергетически выгодной, чем на внешней поверхности АУ (выигрыш в энергии составил 346,3 и 140,1 кДж/моль соответственно) [7]. В качестве модели плоской гидрофобной поверхности была взята поверхность графита, так как уголь представляет собой совокупность разориентированных графитовых кристаллитов. При этом предполагалось, что принцип заполнения плоской поверхности соответствует механизму адсорбции веществ в мезо- и макропорах угля.

Как оказалось, присутствие на поверхности угля модифицирующего анионогенного полимера незначительно ухудшает сорбционную активность обоих АУ по отношению к анионному ПАВ. Это обусловлено увеличением поверхностной активности и уменьшением растворимости ДСН в результате электростатического отталкивания одноименно заряженных функциональных групп САЦ и ПАВ. В случае катионных ПАВ величина адсорбции на модифицированном угле возрастает вследствие взаимодействия САЦ с ПАВ.

В табл. 4 представлены результаты использования модифицированного угля ОУ-А для адсорбционного извлечения ПАВ из жидких радиоактивных отходов (ЖРО) Калининской АЭС, характеризующихся высокими значениями ХПК (химическое потребление кислорода) вследствие большого содержания

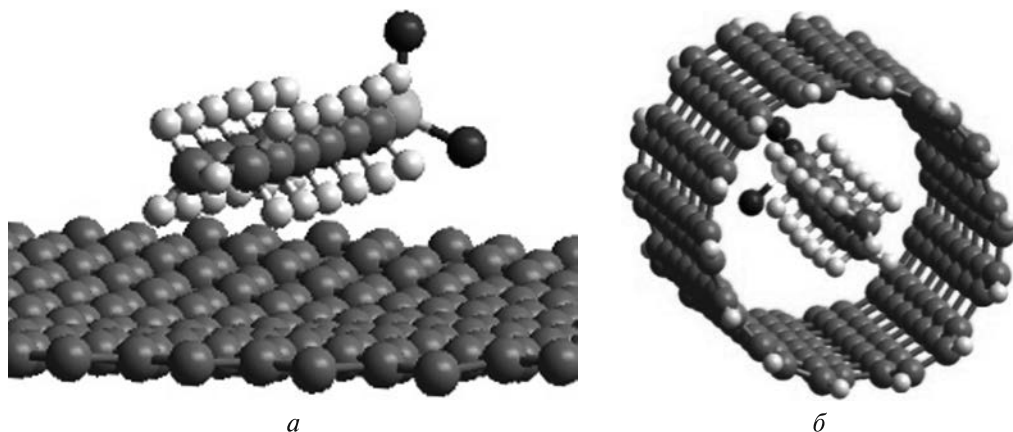


Рис. 4. Компьютерная модель расположения адсорбированного ДСН [7]:
а – на поверхности АУ; б – в поре АУ

поверхностно-активных веществ [8]. Для данного реального объекта удалось не только практически полностью удалить органические вещества, о чем свидетельствует существенное снижение ХПК, но и в 1,5–2 раза уменьшить объемную активность по радиоактивному кобальту. При этом количество угольного сорбента в 1 дм³ очищаемой воды составило всего 2,5 г. Также было показано, что при достаточном количестве сорбента из растворов могут удаляться не только анионные ПАВ, но и комплексообразующие добавки и органические соединения кобальта.

Таблица 4

Результаты обработки реальных ЖРО модифицированным угольным сорбентом

ЖРО	Параметр ЖРО	Исходный	После обработки	Уменьшение по анализируемому параметру, раз
Кубовый остаток Калининской АЭС	Объемная активность по ⁶⁰ Со, Бк/дм ³	3,5 · 10 ⁴	2,6 · 10 ⁴	1,4
	Оптическая плотность	3,038	2,512	1,2
	ХПК, мг О ₂ /дм ³	8000	40	200

Модифицированные АУ также были эффективно использованы для извлечения эмульгированных нефтепродуктов. Результаты очистки сточных вод Брестского вагоноремонтного завода показали, что после традиционной реагентной обработки и применения нефтеловушек они не могут быть слиты в канализацию. После адсорбционной очистки воды от нефтепродуктов с ис-

пользованием модифицированного ОУ-А очищенные воды соответствовали нормам ПДК для сброса их в городские канализационные системы (табл. 5).

Таблица 5

Результаты очистки воды Брестского вагоноремонтного завода

Показатели	После стандартной очистки	Адсорбционно-коагуляционный метод	ПДК для сточных вод
Нефтепродукты, мг/дм ³	15,5	0,3	0,05
Азот аммонийный, мг/дм ³	3,2	1,6	10
Взвешенные вещества, мг/дм ³	370	7	35–40
Сухой остаток, мг/дм ³	2370	300	1000
рН	10	7,2	6,0–9,0

В то же время было установлено, что для извлечения наслоенных нефтепродуктов использование микро- и мезопористых АУ малоэффективно. Из других углеродных сорбентов, по литературным данным, высокой поглощательной способностью по отношению к разливам нефти обладает аэрогель на основе углеродистых волокон [9]. В настоящей работе для этой цели были использованы такие крупнопористые углеродные сорбенты, как терморасширенный графит (ТРГ), оксид графена и нанотрубки, и в качестве альтернативного варианта – сорбент на основе гидрофобизованного гидролизного лигнина «Лигносорб».

ТРГ отличается слоистой структурой (рис. 5, а), где атомы углерода в графитовых слоях связаны ковалентными связями, а между слоями – слабыми ван-дер-ваальсовыми силами, и характеризуется высокими значениями адсорбции нефтепродуктов (до 50 г/г). При нанесении на поверхностный слой нефтепродукта массой ~ 5 г ТРГ в количестве 0,1 г было зафиксировано «отверждение» последнего, т. е. превращение в твердый монолитный слой, который может быть легко удален с поверхности, хотя и не обладает значительной прочностью.

В отличие от гидрофобного ТРГ углеродные нанотрубки, а также оксид графена за счет высокой гидрофильности при нанесении на слой разлитой по водной поверхности нефти практически сразу переходят в водный слой, образуя устойчивую суспензию, т. е. практически не связывают нефтепродукты.

Порошковый сорбент «Лигносорб», содержащий частицы неправильной формы со сложной неровной текстурой, также как и ТРГ, обладает способностью связывать нефтепродукты в твердый слой, который в отличие от слоя на основе ТРГ характеризуется значительной прочностью. Так, слой нефтенасыщенного

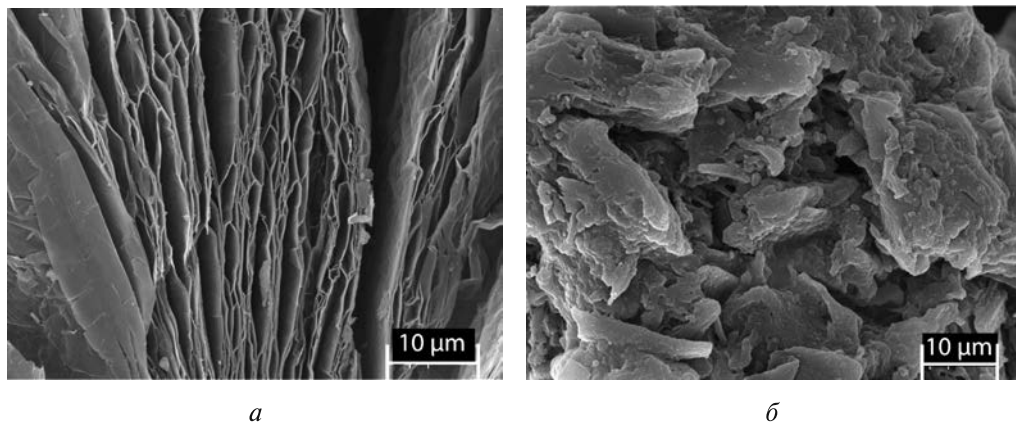


Рис. 5. СЭМ изображение поверхности частиц сорбентов:
а – ТРГ; б – лигниновый сорбент «Лигносорб»

лигнина площадью $12,5 \text{ см}^2$ выдерживает нагрузку до 17 г. В данном случае связывание нефтепродукта происходит за счет капиллярной сорбции в пространстве между частицами лигнина, которые в отличие от частиц ТРГ, имеющих слоистую структуру, характеризуются наличием крупных пор (рис. 5, б). Отсутствие развитой пористой структуры было подтверждено представленными ниже данными по низкотемпературной сорбции азота (рис. 6). Изотерма адсорбции азота на «Лигносорбе» соответствует типу В, т. е. адсорбции на макропористом или непористом адсорбенте с неразвитой внутренней поверхностью. Действительно, рассчитанные для «Лигносорба», полученного из различных образцов гидролизного лигнина, значения площади поверхности (от 3,0 до $29,6 \text{ м}^2/\text{г}$) и объема пор (от 4,5 до $200,0 \text{ мм}^3/\text{г}$), доступных для адсорбции, незначительны, что свидетельствует о несущественном вкладе внутренней пористости лигнина в его адсорбционные характеристики. Величины сорбции стандартных веществ-маркеров (иода и метиленового голубого) соответственно равны 195–370 мг/г (0,77–1,46 ммоль/г) и 73–170 мг/г (0,23–0,53 ммоль/г), что намного ниже аналогичных величин для АУ. При этом лигниновый сорбент характеризуется более высокими по сравнению с АУ значениями сорбции нефтепродуктов, которые изменяются в диапазоне от 1,6 до 2,1 г нефтепро-

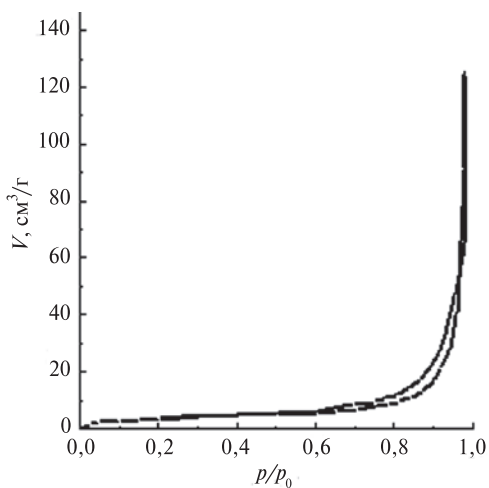


Рис. 6. Изотерма адсорбции-десорбции азота для образца гидролизного лигнина

в диапазоне от 1,6 до 2,1 г нефтепро-

дукта на 1 г сорбента и зависят от вязкости и химического состава нефтепродукта, а также фракционного состава и влажности «Лигносорба».

Как показали результаты реологических исследований [5], дисперсии «Лигносорба» в нефти, содержащие до 20 масс. % сорбента, проявляют ньютоновский характер течения и являются свободнодисперсными системами. При увеличении содержания «Лигносорба» до 40 масс. % дисперсии превращаются в коагуляционно-тиксотропные структурированные системы, для которых площадь петли гистерезиса возрастает с ростом вязкости нефтепродукта (кривая 2, рис. 7). При концентрации «Лигносорба» более 50 масс. % за счет действия капиллярных сил образуется твердая связнодисперсная система – квазигель. Это позволяет превращать слой нефти на поверхности воды в монолитный продукт с определенной прочностью.

На целостность системы указывают и результаты термического исследования исходной нефти и композита нефть – «Лигносорб» (рис. 8): при соотношении компонентов 1 : 1 на ДСК кривых отсутствуют экзоэффекты, характерные для свободной (несвязанной) нефти, т. е. характер терморазложения свидетельствует об образовании единого композиционного материала, а не механической смеси отдельных ее компонентов.

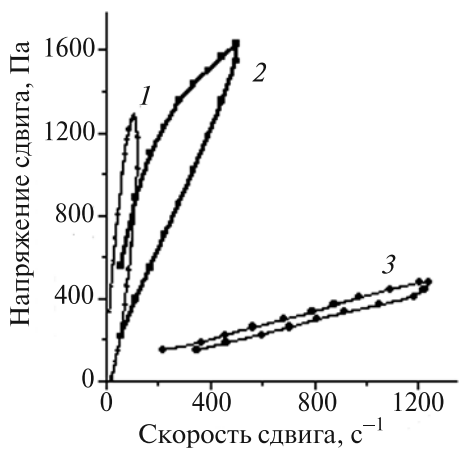


Рис. 7. Петли гистерезиса 40 % дисперсий «Лигносорба» в нефтепродуктах и нефти:
1 – дизельное топливо;
2 – индустриальное масло; 3 – нефть

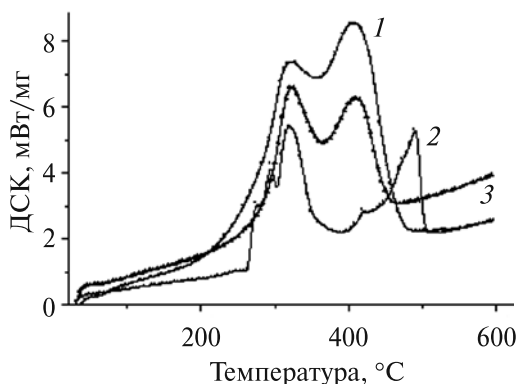


Рис. 8. Кривые ДСК:
1 – лигнинового сорбента «Лигносорб»; 2 – исходной нефти;
3 – композита состава 1 : 1

Лигнинсодержащий сорбент, насыщенный нефтепродуктами, может быть утилизирован в виде твердого топлива в твердотопливных печах при обычных температурах сжигания. Это выгодно отличает его от ТРГ, который утилизируется лишь в высокотемпературных печах. Кроме того, из данных табл. 6 следует, что по теплотворной способности композиционное топливо на основе «Лигносорба» не только не уступает, но и превосходит известные виды

Таблица 6

Высшая теплотворная способность различных видов топлив

Образец	Высшая теплотворная способность, МДж/кг
«Лигносорб» + нефть	$38,8 \pm 0,2$
«Лигносорб» + дизельное топливо	$32,3 \pm 0,2$
«Лигносорб» + промышленное масло	$32,1 \pm 0,2$
«Лигносорб»	$22,7 \pm 0,2$
Бурый уголь	$10,5 \div 15,7$
Каменный уголь	$20,9 \div 30,1$
Антрацит	$26,8 \div 31,4$

твердых топлив. Полученные образцы топлива характеризуются малым содержанием серы, что свидетельствует о его низкой токсичности и пригодности для сжигания.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенные исследования показали, что:

1) гидрофилизация поверхности активированных углей целлюлозным полиэлектролитом обеспечивает получение эффективного и одновременно селективного сорбента, способного удалять растворенные и тонко эмульгированные органические соединения за счет их преимущественной адсорбции в порах и электростатического взаимодействия с полимером. Отличительной особенностью модифицированного АУ по сравнению с исходным является его способность самопроизвольно диспергироваться в воде с образованием однородной устойчивой суспензии, что позволяет интенсифицировать технологический процесс очистки воды;

2) гидрофобизация гидролизного лигнина способствует получению сорбента для удаления поверхностно наложенных нефтепродуктов за счет объемно-капиллярной сорбции. Образование нефтенасыщенным сорбентом твердого монолитного слоя, обладающего значительной прочностью и длительной плавуучестью, обеспечивает легкость его удаления с поверхности воды и последующее использование в качестве высококалорийного топлива.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЕ ССЫЛКИ

1. Кинле Х., Бадер Э. Активные угли и их промышленное применение. Л. : Химия, Ленинград. отд-ние, 1984.
2. Фрог Б. Н., Левченко А. П. Водоподготовка. М. : Химия, 1996.

3. *Каменщиков Ф. А., Богомольный Е. И.* Нефтяные сорбенты. М. ; Ижевск, 2005.
4. ASTM F726 Sorbent performance of Adsorbents, 1999. Annual Book of ASTM Standards. Vol. 11.02. American Society of Testing and Materials. Philadelphia, PA.
5. *Savitskaya T. A., Reznikov I. V., Shcheglov V. A.* [et al.]. Rheological properties of disperse systems based on hydrolyzed lignin and oil // J. Eng. Phys. Thermoph. 2012. Vol. 85, issue 3. P. 662–667.
6. *Грег С., Синг К.* Адсорбция, удельная поверхность, пористость. М. : Мир, 1984.
7. *Иванец М. Г., Савицкая Т. А., Невар Т. Н., Гриншпан Д. Д.* Адсорбция додецил-сульфата натрия на модифицированных угольных адсорбентах // Журн. физ. химии. 2012. Т. 86, № 11. С. 1835–1840.
8. *Иванец М.Г., Савицкая Т.А., Гриншпан Д.Д.* [и др.]. Моделирование адсорбционно-коагуляционной очистки жидких радиоактивных отходов от поверхностно-активных веществ // Журн. прикл. хим. 2012. Vol. 85. №. 1. С. 49–54.
9. *Bi H., Yin Z., Cao X.* Carbon fiber aerogel made from raw cotton: a novel, efficient and recyclable sorbent for oils and organic solvents // Adv. Mater. 2013. Vol. 25, № 41. P. 5916–5921.

Поступила в редакцию 24.12.2014