

УДК 658.567.1

DOI: 10.17277/voprosy.2024.01.pp.007-018

ОЧИСТКА СТОЧНЫХ ВОД ОТ КРАСИТЕЛЯ МЕТИЛЕНОВЫЙ ГОЛУБОЙ ЗОЛОЙ ОТ СЖИГАНИЯ РАСТИТЕЛЬНЫХ И МИНЕРАЛЬНЫХ ОТХОДОВ ПОСЛЕ ЩЕЛОЧНОЙ И СОЛЕВОЙ АКТИВАЦИИ

Т. А. Василенко, И. В. Черныш

*ФГБОУ ВО «Белгородский государственный технологический
университет им. В. Г. Шухова», Белгород, Россия*

Ключевые слова: адсорбция; десорбция; зола от сжигания растительных и минеральных отходов; краситель метиленовый голубой; сорбционная емкость; сорбционный материал.

Аннотация: Представлены результаты по применению сорбционного материала, представляющего собой отход, полученный при совместном сжигании на производстве в котельном оборудовании отработанной отбеливающей глины, содержащей растительные масла (15 – 80 %), отхода механической очистки масличных семян и подсолнечной лузги, для очистки от красителя метиленовый голубой (МГ). Исследованы физико-химические свойства золы. Показано, что МГ сорбируется в полимолекулярной форме на исследуемых материалах и изотермы имеют S-образный вид. Изучена десорбция МГ из полученных образцов. При проведении десорбции установлен физический характер сорбции (краситель МГ вымывается с поверхности сорбционных материалов до 19,4 %).

Введение

К одним из распространенных загрязняющих веществ относятся красители. Методы очистки – фильтрование, адсорбция, коагуляция, очистка реагентами и др. Для этих целей используют отходы производства, природные минералы, биомассу растений. Поиск новых технологий очистки сточных вод не теряет своей актуальности. В работе [1] представлены результаты по использованию штаммов бактерий (*A. brasilense* Sp245, Sp107,

Василенко Татьяна Анатольевна – кандидат технических наук, доцент кафедры экобиотехнологии, e-mail: LAND-VNA78@List.ru; Черныш Ирина Вениаминовна – аспирант кафедры экобиотехнологии, ФГБОУ ВО «Белгородский государственный технологический университет им. В. Г. Шухова», Белгород, Россия.

Sp7, *SR80*, *A. lipoferum Sp59b* и *A. tiophilum Bv-S*) из коллекции микроорганизмов Института биохимии и физиологии растений и микроорганизмов РАН, для которых характерен высокий уровень продукции некоторых ферментов, для очистки модельных растворов от красителей антрахинонового ряда (метилового оранжевого иремазола).

В работе [2] показана возможность получения активированных углей в результате паровоздушной активации отработанного антрацита. Активация при 850 °С обеспечивает увеличение сорбционной емкости полученных сорбентов по метиленовому голубому (МГ) (42...51 мг/г), что более чем в два раза по сравнению с образцами, полученными на основе необработанного антрацита (18...22 мг/г) при концентрации красителя 2 мг/дм³. Результаты исследований, представленные в работе [3] показали, что сорбционные материалы, полученные из отходов молотого кофе, характеризуются высокой сорбционной способностью по отношению как к катионным, так и анионным красителям. Дополнительная модификация раствором пероксида водорода существенно увеличивает площадь удельной поверхности сорбционных материалов за счет формирования более развитой поверхности и пористости. Существует опыт использования в качестве углеродсодержащего сорбционного материала твердого углеродного остатка, полученного после пиролиза изношенных резиновых покрышек [4]. Показано, что сорбционная емкость полученного материала по метиленовому синему составляет 2,881 мг/г.

В работе [5] представлены результаты по использованию в качестве сорбционного материала для очистки модельных растворов от красителя МГ многофункциональных композиционных материалов на основе природных и синтетических полимеров, содержащих в качестве неорганических наполнителей наночастицы магнетита Fe₃O₄. Композиционные материалы на основе полистирол / бентонит / магнетит получены методом механического диспергирования частиц магнетизированной глины в матрице полистирола. Максимальной сорбционной емкостью по МГ ($4,2 \cdot 10^{-4}$ ммоль/г) и эффективностью очистки (60 %) характеризуется материал ПС/бентонит/магнетит с содержанием наполнителя (магнетит) 5 %.

Низкая способность красителей к биологическому разложению лежит в основе низкой эффективности биологических методов очистки окрашенных сточных вод [6]. По этой причине обесцвечивание обычно выполняют физико-химическими методами. Считается, что сорбция является одним из наиболее экономичных и в то же время наиболее экологических методов обесцвечивания сточных вод [7]. Однако его технологическая и экономическая эффективность в основном определяется типом используемого сорбента. К сорбентам, которые наиболее часто используются для обесцвечивания сточных вод, относятся активированные угли. Предполагается, что в промышленных условиях 1 кг активированного угля может удалить около 250 г красителей из сточных вод красильни. Однако сорбционные материалы хорошего качества на основе активированных углей стоят дорого, поэтому ведется поиск их более дешевых заменителей [8]. Отработанный фильтровальный порошок (кизельгуровый шлам), образующийся при фильтрации растительного масла, рассмотрен в качестве углеродсодержа-

щего сорбционного материала после термообработки для очистки растворов от красителя МГ [9, 10]. В научной литературе [11, 12] в качестве сорбционного материала для удаления красителя МГ из водных сред предлагаются растительный опад и опилки платана; скорлупа арахиса и другие материалы. Такие отходы растительного происхождения, как скорлупа грецкого ореха, пивная дробина и гидролизный лигнин, применяются после стадии карбонизации как углеродсодержащие сорбционные материалы [13, 14].

Материалы и методы

Зола от сжигания подсолнечной лузги, отработанной отбеливающей глины, содержащей растительные масла, и отходов механической очистки масличных семян образуется при соотношении вышеуказанных в следующих долях 7 : 1 : 2 (преобладающим компонентом является подсолнечная лузга). Температура сжигания смеси в промышленном котельном оборудовании составляет 700 °С при производительности 5 т/ч. Проведены экспериментальные исследования по извлечению указанной золой красителя МГ из водных сред сорбционным способом. Зола представляет собой несгораемый остаток, состоящий из смеси минеральных оксидов (рис. 1). Данный отход образуется на предприятии АО «ЭФКО» (Алексеевка, Белгородская обл.) и в настоящее время не подлежит вторичному использованию. Общее количество отхода золы достигает до 6 тыс. т/год, поэтому вопрос его использования актуален. Отход имеет пористую поверхность, что дает возможность его использования в качестве сорбционного материала для удаления красителя МГ из водных сред. Преобладающим соединением является оксид кремния (содержание в золе – до 37 %), в меньшем количестве содержатся оксиды щелочноземельных и щелочных металлов: магния оксид – 11,54 % и калия оксид – 11,17 %.

Химический состав золы от сжигания лузги подсолнечной, отработанной отбеливающей глины, содержащей растительные масла, и отхода механической очистки масличных семян приведены ниже, %:

SiO ₂	36,95
MgO.....	11,54
K ₂ O.....	11,17
CaO.....	9,51
Al ₂ O ₃	9,24
P ₂ O ₅	8,8
Na ₂ O	6,56
Fe ₂ O ₃	3,85
SO ₂	1,63
TiO ₂	0,581
Хлориды	0,0681
MnO.....	0,0674
NiO	0,0142
CuO	0,0122
ZnO.....	0,0071

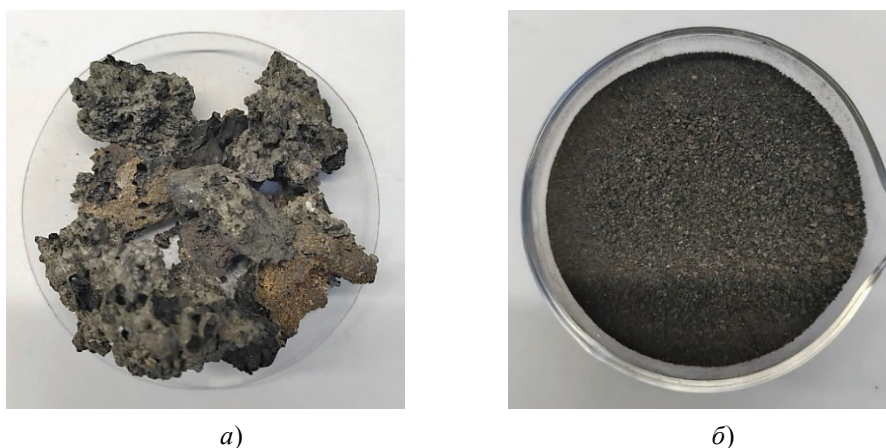


Рис. 1. Зола от сжигания лузги подсолнечной, отработанной отбеливающей глины, содержащей растительные масла, и отходов механической очистки масличных семян: *а* – исходный образец; *б* – после измельчения (размер фракции менее 1 мм)

Растворимость золы в нейтральной среде очень низкая и составляет 0,08 %, однако при повышении кислотности или щелочности среды растворимость увеличивается до 21 и 17 % соответственно. Наличие таких металлов, как калий, натрий, кальций, магний, образуют соединения, которые являются причиной высокой щелочности отхода (значение pH водной вытяжки отхода равно 10,48). Физико-химические свойства отхода золы от сжигания представлены далее.

Плотность, кг/м ³ :	
истинная	2157
насыпная.....	922
pH водной вытяжки.....	10,48
Растворимость, %:	
дистиллированная вода (pH = 7,0).....	0,08
раствор соляной кислоты HCl (pH = 1,0)	21,03
раствор гидроксида натрия NaOH (pH = 14,0).....	17,14
Удельная поверхность (прибор ПСХ-10), см ² /г	878

Структура золы и энергодисперсионный состав определены на сканирующем электронном микроскопе высокого разрешения TESCAN MIRA 3 LMU. В таблице 1 представлен элементный состав отхода. Поверхность золы неоднородная, содержание элементов на поверхности частиц золы варьирует при проведении сканирующей микроскопии. На первом месте в составе преобладает кислород, концентрация которого составляет 46,28 – 61,26 %; на втором – кремний (0,84 – 25,44 %); на третьем – калий (2,0 – 16,09 %); содержание углерода составляет 0,06 – 5,93 %.

На микрофотографиях (рис. 2) фиксируются открытые с утолщением макропоры (со средним диаметром более 50 нм). Фактический размер пор – от 0,5 до 1,5 мкм (рис. 2, *а*).

Таблица 1

Элементный состав золы от сжигания лузги подсолнечной, отработанной отбеливающей глины, содержащей растительные масла, и отходов механической очистки масличных семян

Элементный состав, %	Номер спектра					
	1	4	11	14	21	22
C	0,11	0,06	0,24	5,93	0,20	0,09
O	46,28	46,31	47,25	55,17	61,26	59,90
Na	7,43	2,07	0,54	1,38	6,84	7,66
Mg	2,04	4,79	2,46	4,20	1,78	3,62
Al	6,22	2,03	7,43	—	4,89	4,53
Si	25,44	17,28	23,39	0,84	19,18	17,77
P	—	1,79	0,73	3,82	—	0,41
S	0,38	2,22	—	1,30	0,25	—
Cl	—		0,61	—		
K	3,68	8,60	13,55	16,09	2,00	2,14
Ca	2,57	8,65	1,43	10,66	1,36	2,54
Ti	0,58	0,84	0,44	—	0,26	0,19
Fe	5,25	5,36	2,54	—	1,99	1,15

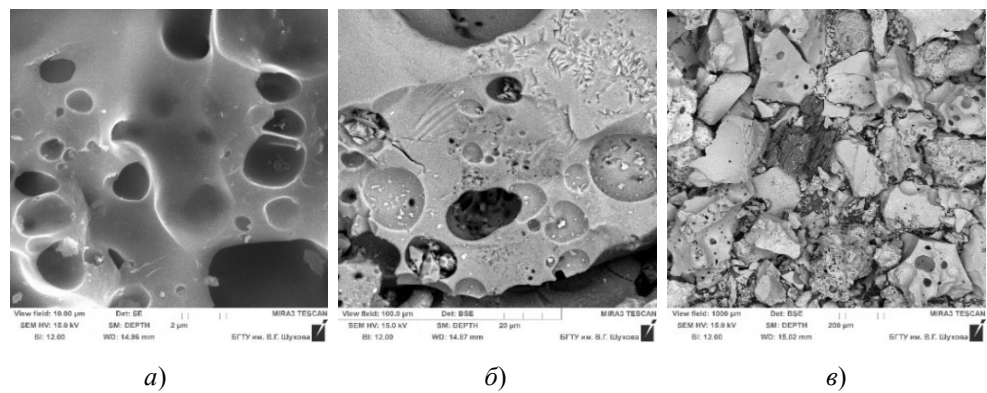


Рис. 2. Микрофотографии частиц золы при размере фракций, мкм:
а – 1...10; б – 1...100; в – 1...1000

Результаты и обсуждение

Отход имеет пористую поверхность, поэтому его можно использовать в качестве сорбционного материала. В работе применяли модифицированный материал, для этого вначале отход измельчали до порошкообразного состояния с размером фракции 1 мм. Предварительную химическую обработку в целях повышения сорбционной емкости проводили в следующем порядке. Модификацию осуществляли различными растворами: гидроксидом натрия – 5 и 20 %; солью хлорида натрия – 5 и 20 %. Время модифика-

ции – 24 ч. Отношение массы отхода золы к объему модифицирующего раствора готовили из соотношения Т : Ж = 1 : 10. После 24 ч взаимодействия пробы отфильтровывались через обеззоленный фильтр «Белая лента». Далее проводили отмывание модифицированной золы дистиллированной водой до нейтрального значения pH и высушивание при температуре 105 °С.

Материал после модификации использовался для адсорбционных исследований в отношении красителя МГ (начальные концентрации $C_{\text{МГ}}$ равны 50; 150; 300; 500; 1000; 1500 мг/дм³). Исходные значения pH приготовленных растворов, содержащих краситель МГ, при указанных начальных концентрациях находились в диапазоне от 5,439 до 5,961. Водная вытяжка из исходной золы имеет щелочную среду – 10,48. После установления сорбционного равновесия в колбах с модельными растворами и золой (Т : Ж = 1 : 100) значение pH растворов находилось в пределах от 9,00 до 9,12. Одним из существенных факторов удаления красителя является pH раствора. Степень кислотности существенно влияет на адсорбцию из-за присутствия в растворе водорода и гидроксильных ионов. Получены результаты адсорбции красителя в статических условиях на поверхности материалов до и после модификации. Начальная ($C_{\text{нач}} = 50 \dots 1500$ мг/дм³) и конечные концентрации красителя определяли фотометрическим методом на приборе спектрофотометр «СПЕКС ССП серии 705», при использовании светофильтра с длиной волны $\lambda = 400$ нм в кюветах с толщиной поглощающего свет слоя 10 мм. Адсорбционную активность по метиленовому голубому X, мг/г, вычисляют по формуле

$$X = \frac{(C_{\text{нач}} - C_{\text{рав}}) V}{m}, \quad (1)$$

где $C_{\text{нач}}$, $C_{\text{рав}}$ – соответственно начальная и конечная концентрации МГ в модельных растворах после установления равновесия, мг/дм³; V – объем раствора, дм³; m – масса навески, г.

На рисунке 3 представлены изотермы адсорбции красителя МГ на исходной и модифицированной золе. Анализ данных изотерм адсорбции показал, что предельная адсорбция МГ составляет 10,53 мг/г при модификации исходной золы 20%-м раствором гидроксида натрия при исходной концентрации МГ, равной 1500 мг/дм³, что на 6,8 % выше, чем для нативной формы материала. Предельная адсорбция для исходной золы и золы, обработанной 5%-м раствором гидроксида натрия, практически равны (значения 9,87 и 9,73 мг/дм³ соответственно). Сорбционная емкость понижается на 23,7 и 27,1 % по отношению к исходной золе при модификации 5-ти и 20%-ми растворами хлорида натрия. Экспериментально установлено, что МГ сорбируется в полимолекулярной форме на исследуемых материалах и изотермы имеют S-образный вид.

Изучена десорбция МГ из полученных образцов. Для этого использовали высушенные образцы модифицированной и нативной золы после сорбции МГ, где его исходная концентрация составляла 1500 мг/дм³.

Десорбцию проводили дистиллированной водой (Т : Ж = 1 : 100) при времени установления равновесия 48 ч. Высвобождение МГ зависит от pH и ионной силы среды.

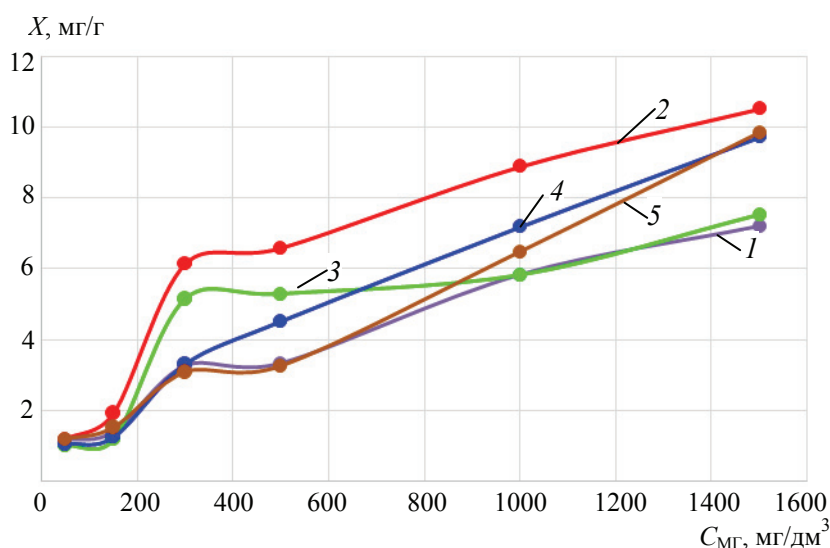


Рис. 3. Изотермы адсорбции красителя МГ на исходной и модифицированной золе (модификация щелочью и хлоридом натрия):
1 – раствор щелочи NaOH (5 %); 2 – раствор щелочи NaOH (20 %);
3 – раствор соли NaCl (5 %); 4 – раствор соли NaCl (20 %); 5 – исходная зола

Установлено следующее, краситель МГ вымывается с поверхности всех материалов от 18,2 до 19,4 %, что свидетельствует о физической адсорбции красителя. Покажем процентное вымывание красителя МГ с поверхности модифицированной и исходной золы при десорбции дистиллированной водой:

Растворы для модификации золы, %	
NaOH:	
5	18,2
20	18,9
NaCl:	
5	18,0
20	18,9
Исходная зола	19,4

Анализ ИК-спектров исходных сорбционных материалов – золы от сжигания растительных материалов и отбелной глины до и после сорбции красителя МГ, показал следующие изменения: для связей О–Н и С–Н фиксируются изменения положений и интенсивности полос поглощения ν (рис. 4). В частности, широкая полоса, имеющая значение $3458,37\text{ см}^{-1}$ в спектре исходного сорбционного материала золы, после сорбции МГ смещается в низкочастотную область и проявляется с большей интенсивностью в положении $3431,36\text{ см}^{-1}$, которое характерно для валентных колебаний связи гидроксильных групп (О–Н). После сорбции МГ фиксируется значительный эффект увеличения интенсивности полосы $1051,2\text{ см}^{-1}$, характерной для деформационных колебаний связей О–Н. Валентные асимметричные и симметричные колебания связей С–Н в исходном сорбционном материале характеризуются узкими полосами при $2926,01$ и $2854,65\text{ см}^{-1}$, которые на ИК-спектре золы после сорбции МГ смещаются

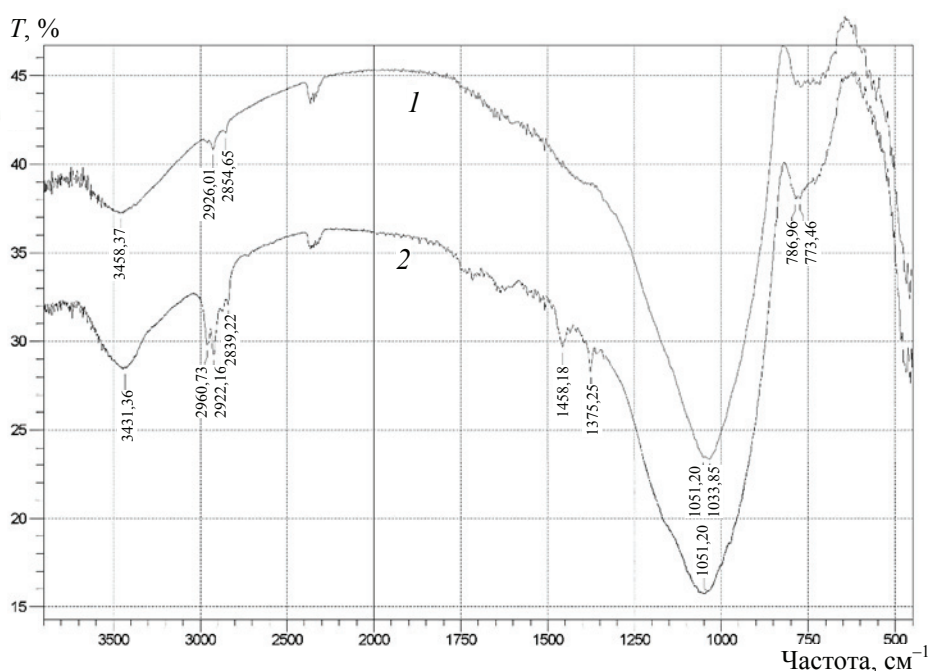


Рис. 4. ИК-спектры сорбционного материала до сорбции красителя МГ (1) и после (2)

в низкочастотную область – в положения $2922,16$ и $2854,65\text{ см}^{-1}$ соответственно, с увеличением интенсивности и появляется дополнительная полоса при $2960,75\text{ см}^{-1}$. После сорбции МГ появляется полоса $1458,12\text{ см}^{-1}$ с достаточной интенсивностью, которая характеризует деформационные колебания связей С–Н. По другим данным появление полос в области $1450\ldots1410\text{ см}^{-1}$ можно отнести как к карбонатам, так и группам С–О–С, С–Н, С–ОН [15, 16]. Смещение в низкочастотную область, согласно литературным данным [17, 18], свидетельствует об ионизации функциональных групп, которые имеются на поверхности сорбционного материала, и образовании связи между ними и молекулами МГ.

Таким образом, можно заключить, что функциональные группы О–Н и С–Н, присутствующие на поверхности сорбционного материала золы, преимущественно участвуют в процессе сорбции молекул красителя МГ из водных растворов, что согласуется с литературными данными.

Заключение

Проведенные эксперименты свидетельствуют, что отход – зола от сжигания лузги подсолнечной, отработанной отбеливающей глины, содержащей растительные масла, и отходов механической очистки масличных семян, можно потенциально рассматривать как сырье для получения композиционного сорбционного материала, при его измельчении и с последующей химической обработкой. Данная зола образуется при совместном сжигании на производстве в котельном оборудовании ($T = 700\text{ }^{\circ}\text{C}$) отработанной отбеливающей глины, содержащей растительные масла (от 15 до 80 %), отхода механической очистки масличных семян и подсолнечной лузги для очистки от красителя МГ.

Исследованы физико-химические свойства золы; значение pH водной вытяжки равно 10,48; удельная поверхность измельченного порошкообразного материала, прошедшего через сито с размером ячеек 1 мм, составляет $878 \text{ см}^2/\text{г}$. Модификацию порошка золы проводили различными растворами: гидроксидом натрия – 5 и 20 %; хлоридом натрия – 5 и 20 %. Модификация золы 20%-м раствором NaOH повышает сорбционные свойства золы с 6,5 до 8,9 мг/г при концентрации МГ в растворе $1000 \text{ мг}/\text{дм}^3$, и с 3,3 до 6,6 мг/г при концентрации МГ в растворе $500 \text{ мг}/\text{дм}^3$. Предельная адсорбция МГ при модификации исходной золы 20%-м раствором NaOH при исходной концентрации МГ, равной $1500 \text{ мг}/\text{дм}^3$, на 6,8 % выше, чем для нативной формы материала. Сорбционная емкость понижается на 23,7 и 27,1 % по отношению к исходной золе при модификации 5%-м и 20%-м растворами NaCl. Следует констатировать, что МГ сорбируется в полимолекулярной форме на исследуемых материалах и изотермы имеют S-образный вид. Исследование процессов десорбции показало, что краситель МГ вымывается с поверхности всех материалов от 18,2 до 19,4 %, что свидетельствует о физической адсорбции красителя на исследуемом материале, основополагающем при взаимодействии экспериментально полученных сорбционных материалов и адсорбата.

Работа выполнена с использованием оборудования на базе Центра высоких технологий БГТУ им. В. Г. Шухова.

Список литературы

1. Биодegradация синтетических красителей бактериями рода *Azospirillum* / С. А. Воробьева, М. А. Купряшина, Е. Г. Пономарёва, А. М. Петерсон, В. Е. Никитина // Известия Саратовского университета. Новая серия. Серия: Химия. Биология. Экология. – 2017. – Т. 17, № 3. – С. 328–329. doi: 10.18500/1816-9775-2017-17-3-328-329
2. Физико-химические основы новой технологии получения активированных углей на основе антрацита / К. Б. Хоанг, З. К. Ондаганова, С. М. Пестов [и др.] // Водоочистка. Водоподготовка. Водоснабжение. – 2017. – № 5(113). – С. 26 – 32.
3. Минь Фам Тхань. Исследование адсорбции красителей материалами, полученными из отходов молотого кофе / Фам Тхань Минь, О. Е. Лебедева // Сорбционные и хроматографические процессы. – 2017. – Т.17, № 5. – С. 756 – 763. doi: 10.17308/sorpchrom.2017.17/436
4. Асташина, М. В. Утилизация твердого углеродного остатка пиролиза и резиновой крошки изношенных шин для очистки сточных вод / М. В. Асташина, А. А. Булатова // Строительство и техногенная безопасность. – 2019. – № 17(69). – С. 61 – 68.
5. Кинетика сорбции метиленового голубого на пленочных композитах полистирол/бентонит/магнетит / О. В. Алексеева, А. Н. Родионова, Н. А. Багровская, А. В. Носков, А. В. Агафонов // Физикохимия поверхности и защита материалов. – 2018. – Т. 54, № 4. – С. 378 – 383. doi: 10.7868/S0044185618040083
6. Review on Hybrid Energy Systems for Wastewater Treatment and Bio-Energy Production / P. F. Tee, M. O. Abdullah, I. A. W. Tan, N. K. A. Rashid, M. A. M. Amin, C. Nolasco-Hipolito, K. Bujang // Renewable and Sustainable Energy Reviews. – 2016. – No. 54. – P. 235 – 246.
7. Abou-Shady, A. Electro-Agric, a Novel Environmental Engineering Perspective to Overcome the Global Water Crisis Via Marginal Water Reuse / A. Abou-Shady,

H. El-Araby // Natural Hazards Research. – 2021. – Vol. 1, No. 4. – P. 202 – 226. doi: 10.1016/j.nhres.2021.10.004

8. Groundwater Quality and Health Assessments Based on Heavy Metals and Trace Elements content in Dakhla Osis, New Valley Governorate, Egypt / H. M. Saleh, S. B. Eskander, H. H. Mahmoud, M. I. Abdou // Water Science. – 2022. – Vol. 36, No. 1. – P. 1 – 12. doi: 10.1080/23570008.2021.2018540

9. Отработанный кизельгуровый шлам маслоэкстракционного производства – сырье для получения сорбционного материала / И. В. Старостина, С. В. Свергузова, Д. В. Столяров [и др.] // Вестник технологического университета. – 2017. – Т. 20, № 16. – С. 133 – 136.

10. Извлечение красителя метиленовый голубой из растворов биомассой опилок платана / В. А. Белый, С. В. Свергузова, И. Г. Шайхиев [и др.] // Химия и химическая технология. – 2023. – Т. 66, № 5. – С. 139 – 145. doi: 10.6060/ivkkt.20236605.6757

11. Сорбционные свойства листового опада платана по отношению к красителю метиленовому голубому / С. В. Свергузова, И. Г. Шайхиев, Ж. А. Сапронова, А. В. Святченко // Chemical Bulletin. – 2020. – Т. 3, № 4. – С. 5 – 13.

12. Получение углеродсодержащих сорбционных материалов из вторичного растительного сырья / А. И. Везенцев, Тьяу Нгуен Хоай, Н. Г. Габрук [и др.] // Научные ведомости Белгородского государственного университета. Серия: Естественные науки. – 2017. – № 18 (267). – С. 15 – 20.

13. Руденко, Е. Ю. Адсорбенты из отходов пивоваренной промышленности для удаления загрязнений из природных и сточных вод / Е. Ю. Руденко // Экология и промышленность России. – 2022. – Т. 26, № 10. – С. 16 – 21. doi: 10.18412/1816-0395-2022-10-16-21.

14. Получение активированных углей из гидролизного лигнина с использованием отходов стадии карбонизации / В. В. Самонин, Е. А. Спиридонова, М. Л. Подвязников [и др.] // Экология и промышленность России. – 2022. – № 26(9). – С. 4 – 9. doi: 10.18412/1816-0395-2022-9-4-9

15. Платонова, Д. С. Модифицированные сорбенты из сапропеля для очистки сточных вод / Д. С. Платонова, А. В. Гурин, Л. Н. Адеева // Экология и промышленность России. – 2016. – № 20(11). – С. 20 – 25. doi: 10.18412/1816-0395-2016-11-20-25

16. Filip, Z. Microbial Utilization and Transformation of Humic Acid-Like Substance Extracted from a Mixture of Municipal Refuse and Sewage Sludge Disposed of in a Landfill / Z. Filip, W. Pecher, J. Berthelin // Environmental Pollution. – 2000. – Vol. 109, No. 1. – P. 83 – 89. doi: 10.1016/S0269-7491(99) 00229-8

17. Кислотно-основная активация углеродсодержащего сорбционного материала и его применение для извлечения красителя метиленовый голубой из водных сред / И. В. Старостина, Д. О. Половнева, Ю. Л. Макридина, Е. В. Локтионова // Вопросы современной науки и практики. Университет им. В. И. Вернадского. – 2021. – № 4(82). – С. 29 – 38. doi: 10.17277/voprosy.2021.04.pp.029-038

18. Диденко, Т. А. Кислотно-основная активация углеродно-минерального материала и его применение для извлечения ионов меди (II) из водных растворов / Т. А. Диденко, А. О. Богданова // Омский научный вестник. – 2015. – № 3(143). – С. 358 – 361.

References

1. Vorobeva S.A., Kupryashina M.A., Ponomareva E.G., Peterson A.M., Nikitina V.E. [Biodegradation of Synthetic Dyes Bacteria of the Genus *Azospirillum*], *Izvestiya Saratovskogo universiteta. Novaya seriya. Seriya: Khimiya. Biologiya. Ekologiya* [News of Saratov University. New episode. Series: Chemistry. Biology.

Ecology], 2017, vol. 17, no. 3, pp. 328-329. doi: 10.18500/1816-9775-2017-17-3-328-329 (In Russ., abstract in Eng.)

2. Hoang K.B., Ondaganova Z.K., Pestov S.M. [et al.]. [Physico-chemical bases of a new technology for producing activated carbons based on anthracite], *Vodoochistka. Vodopodgotovka. Vodosnabzheniye* [Water purification. Water treatment. Water supply], 2017, no. 5(113), pp. 26-32. (In Russ., abstract in Eng.)

3. Pham Thanh Minh, Lebedeva O.E. [Investigation of the adsorption of dyes by materials obtained from ground coffee waste], *Sorbtsionnyye i khromatograficheskiye protsessy* [Sorption and chromatographic processes], 2017. vol. 17, no. 5, pp. 756-763, doi: 10.17308/sorpchrom.2017.17/436 (In Russ., abstract in Eng.)

4. Astashina M.V., Bulatova A.A. [Disposal of solid carbon residual pyrolysis and rubber crush of wire tires for waste water treatment], *Stroitel'stvo i tekhnogennaya bezopasnost'* [Construction and technogenic safety], 2019. no. 17(69). pp. 61-68, doi: 10.7868/S0044185618040083 (In Russ., abstract in Eng.)

5. Alekseeva O.V., Rodionova A.N., Bagrovskaya N.A., Noskov A.V., Agafonov A.V. [Kinetics of methylene blue sorption on poly-styrene film composites/bentonite/magnetite], *Fizikokhimiya poverkhnosti i zashchita materialov* [Surface physical chemistry and material protection], 2018. vol. 54, no. 4. pp. 378-383 (In Russ., abstract in Eng.)

6. Tee P.F., Abdullah M.O., Tan I.A.W., Rashid N.K.A., Amin M.A.M., Nolasco-Hipolito C., Bujang K. Review on hybrid energy systems for wastewater treatment and bio-energy production, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2016, no. 54, pp. 235-246.

7. Abou-Shady A., El-Araby H. Electro-agric, a novel environmental engineering perspective to overcome the global water crisis via marginal water reuse, *Natural Hazards Research*, 2021, vol. 1, no. 4, pp. 202-226. doi: 10.1016/j.nhres.2021.10.004

8. Saleh H.M., Eskander S.B., Mahmoud H.H., Abdou M.I. Groundwater quality and health assessments based on heavy metals and trace elements content in Dakhla Osis, New Valley Governorate, Egypt, *Water Science*, 2022, vol. 36, no. 1, pp. 1-12, doi: 10.1080/23570008.2021.2018540

9. Starostina I.V., Sverguzova S.V., Stolyarov D.V., Porozhniuk Ye.V., Anichina Ya.N., Shaikhiev I.G. [Spent kieselguhr sludge from oil extraction production - raw material for obtaining sorption material], *Vestnik tekhnologicheskogo universiteta* [Bulletin of the Technological University], 2017, vol. 20, no. 16, pp. 133-136 (In Russ., abstract in Eng.)

10. Belyy V.A., Sverguzova S.V., Shaikhiev I.G., Sapronova Zh.A., Voronina Yu.S. [Extraction of the methylene blue dye from solutions with sycamore biomass sawdust], *Khimiya i khimicheskaya tekhnologiya* [Chemistry and chemical technology], 2023, vol. 66, no 5. pp. 139-145. doi: 10.6060/ivkkt.20236605.6757 (In Russ., abstract in Eng.)

11. Sverguzova S.V., Shaykhiev I.G., Sapronova Zh.A., Svyatchenko A.V. [Sorption properties of sycamore leaf litter in relation to methylene blue dye], *Chemical Bulletin*, 2020. vol. 3, no. 4, pp. 5-13 (In Russ., abstract in Eng.)

12. Vezenzev A.I., Nguen Hoay Tyau, Gabruk N.G., Oleynikova I.I., Chuteeva T.A. [Production of carbon-containing sorption materials from secondary vegetable raw materials], *Nauchnyye vedomosti Belgorodskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Yestestvennyye nauki* [Scientific statements of the Belgorod State University. Series: Natural Sciences], 2017. vol. 18, no. 267, pp. 15-20 (In Russ., abstract in Eng.)

13. Rudenko E.Yu. [Waste-derived adsorbents from brewing industry for pollutant removal in natural waters and wastewaters], *Ekologiya i promyshlennost' Rossii* [Ecology and Industry of Russia], 2022, vol. 26, no. 10, pp. 16-21. doi: 10.18412/1816-0395-2022-10-16-21 (In Russ., abstract in Eng.)

14. Samonin V.V., Spiridonova E.A., Podvyaznikov M.L., Khrylova E.D., Khokhlachev S.P., Klischevskaya L.S. [Obtaining Activated Carbons from Hydrolysed

Lignin Using Waste Products of the Carbonization Process], *Ekologiya i promyshlennost' Rossii* [Ecology and Industry of Russia], 2022, vol. 26, no. 9, pp. 4-9. doi: 10.18412/1816-0395-2022-9-4-9 (In Russ., abstract in Eng.)

15. Platonova D., Gurin A., Adeeva L. [Modified sorbents from sapropel for wastewater treatment], *Ekologiya i promyshlennost' Rossii* [Ecology and Industry of Russia], 2016, no. 20(11), pp. 20-25. doi: 10.18412/1816-0395-2016-11-20-25 (In Russ., abstract in Eng.)

16. Filip Z., Pecher W., Berthelin J. Microbial utilization and transformation of humic acid-like substance extracted from a mixture of municipal refuse and sewage sludge disposed of in a landfill, *Environmental Pollution*, 2000, vol. 109, pp. 83-89. doi: 10.1016/S0269-7491(99) 00229-8

17. Starostina I.V., Polovneva D.O., Makridina Yu.L., Loktionova E.V. [Acid-basic activation of carbon-containing sorption material and its application for extraction of methylene blue dye from aquatic media], *Voprosy sovremennoi nauki i praktiki. Universitet im. V.I. Vernadskogo* [Problems of Contemporary Science and Practice. Vernadsky University], 2021, vol. 4, no. 82, pp. 29-38. doi: 10.17277/voprosy.2021.04.pp.029-038 (In Russ., abstract in Eng.)

18. Didenko T.A., Bogdanova A.O. [Acid-base activation of carbon-mineral material and its application for extraction of copper (II) ions from aqueous solutions], *Omskiy nauchnyy vestnik* [Omsk Scientific Bulletin], 2015, no. 3(143), pp. 358-361 (In Russ., abstract in Eng.).

Removal of Methylene Blue Dye from Wastewater Resulting from Plant and Mineral Waste Incineration after Alkaline and Salt Activation

T. A. Vasilenko, I. V. Chernysh

*Belgorod State Technological University
named after V. G. Shukhov, Belgorod, Russia*

Keywords: adsorption; desorption; ash from burning plant and mineral waste; methylene blue dye; sorption capacity; sorption material.

Abstract: The paper presents the results on the use of sorption material, which is a waste obtained from the co-combustion of waste bleaching clay containing vegetable oils (15–80 %), waste from the mechanical cleaning of oil seeds and sunflower husks for cleaning from the methylene blue (MB) dye. The physicochemical properties of ash were studied. It was shown that MG is adsorbed in a polymolecular form on the materials under study and the isotherms are S-shaped. The MB desorption from the obtained samples was studied. During desorption, the physical nature of sorption was established (MB dye is washed out from the surface of sorption materials up to 19.4 %).

© Т. А. Василенко, И. В. Черныш, 2024