

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ СВЯЗУЮЩИХ НА АДсорбЦИОННЫЕ ПАРАМЕТРЫ АКТИВИРОВАННЫХ УГЛЕЙ, ПОЛУЧЕННЫХ ИЗ РАСТИТЕЛЬНЫХ ОТХОДОВ АГРОПРОМЫШЛЕННОГО КОМПЛЕКСА

Р.Г. Сафин, В.Г. Сотников, Т.О. Степанова

Кафедра Переработки древесных материалов, ФГБОУ ВО «КНИТУ», Казань, Россия

E-mail: vcvvcv12345678@gmail.com

Термохимическим методом получены гранулированные активированные угли из растительных предшественников с применением пиролизной смолы и гудрона в качестве связующих веществ. Было проведено исследование влияния пиролизной смолы и гудрона на качественные характеристики гранулированного активированного угля. Определены рациональные технологические параметры температуры процесса водопаровой активации гранулированного активированного угля. Установлено, что вид связующего вещества в меньшей степени влияет на формирование пористой структуры активированного угля. Установлена взаимосвязь между степенью выгорания и прочностью на истирание. Определены рациональные концентрации активирующего агента и связующего вещества для получения активированных углей с высокой адсорбционной способностью.

Ключевые слова: связующее вещество, активированный уголь, растительное сырье, термическое разложение, водопаровая активация

STUDY OF THE INFLUENCE OF BINDERS ON THE ADSORPTION PARAMETERS OF ACTIVATED CARBON OBTAINED FROM PLANT WASTE OF THE AGRO-INDUSTRIAL COMPLEX

R.G. Safin, V.G. Sotnikov, T.O. Stepanova

Department of Wood Materials Processing, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "KNITU", Kazan, Russia

E-mail: vcvvcv12345678@gmail.com

Granulated activated carbons were obtained from plant precursors using a thermochemical method with the use of pyrolysis resin and tar as binders. The effect of pyrolysis resin and tar on the quality characteristics of granulated activated carbon was studied. Rational technological parameters of the temperature of the process of water-steam activation of granulated activated carbon were determined. It was found that the type of binder has a lesser effect on the formation of the porous structure of activated carbon. A relationship was established between the degree of burnout and abrasion resistance. Rational concentrations of the activating agent and binder for obtaining activated carbons with high adsorption capacity were determined.

Key words: binder, activated carbon, plant material, thermal decomposition, steam activation

Для цитирования:

Сафин Р.Г., Сотников В.Г., Степанова Т.О. Исследование влияния связующих на адсорбционные параметры активированных углей, полученных из растительных отходов агропромышленного комплекса. *Рос. хим. ж. (Ж. Рос. хим. об-ва)*. 2024. Т. LXVIII. № 2. С. 38–44. DOI: 10.6060/RCJ.2024682.5.

For citation:

Safin R.G., Sotnikov V.G., Stepanova T.O. Study of the influence of binders on the adsorption parameters of activated carbon obtained from plant waste of the agro-industrial complex. *Ros. Khim. Zh.* 2024. V. 68. N 2. P. 38–44. DOI: 10.6060/RCJ.2024682.5.

ВВЕДЕНИЕ

Активированный уголь – адсорбент, широко используемый в быту и промышленности для очистки жидкостей и газов.

В настоящее время активированный уголь получают пирогенетической переработкой и активацией углеродосодержащего сырья.

Активированный уголь, в зависимости от его назначения, имеет различную форму частицы. Наиболее широкое распространение имеют марки порошковых, дробленых и гранулированных активированных углей. Получение гранулированных активированных углей является наиболее трудоемкой задачей, поскольку характеристики угля зависят не только от режима пиролиза и активации, но и от параметров процесса формирования и характеристик связующего вещества.

В связи с этим в работе поставлена задача исследования влияния связующих веществ на адсорбционные показатели активированных углей, полученных из растительных отходов агропромышленного комплекса.

Получение гранулированного активированного угля из растительных отходов возможно двумя способами. Первый способ состоит в их сушке, пиролизе, активации, охлаждении, смешении со связующим и грануляции. Данный метод является наиболее широко применимым, однако требует тщательного контроля при смешивании пластичной массы, поскольку возможно закупоривание пор в гранулах угля, что непременно ведет к снижению его качества. Еще одним недостатком способа является высокая токсичность смол, чаще всего используемых в качестве связующего, что накладывает некоторые ограничения при использовании активированного угля. Второй способ состоит в том, что пиролизу и активации подвергаются уже сформованные гранулы, предварительно измельченного в муку растительного сырья. Данный метод позволяет обойти недостатки предыдущего способа, однако прочностные характеристики значительно ниже и требуют оптимизации.

В данной работе проведено исследование по получению гранулированного активированного угля из растительных отходов агропромышленного комплекса с применением различных связующих компонентов и сравнению адсорбционной способности полученных образцов.

МЕТОДЫ И МАТЕРИАЛЫ

В качестве сырья для получения образцов активированного угля использовались: неликвидная кусковая древесина березы, скорлупа грецкого ореха, лузга семян подсолнечника, костра льна.

В качестве связующего вещества были использованы: пиролизная смола – вторичный продукт термического разложения растительных отходов, гудрон – остатки ректификации мазута.

Таблица 1

Характеристики связующих компонентов

Характеристика	Смола пиролизная	Гудрон
Плотность при 20 °С, кг/м ³	1050	975
Вязкость кинематическая при 50 °С, мм ² /с	28	67
Коксуемость, мас. %	8,0	15,0

Для подготовки к первой серии экспериментов сырье было измельчено до размеров 0,1 мм и высушено до достижения воздушно-сухого состояния, затем четыре вида сырья в равных количествах смешивались со связующим в различных соотношениях. Готовую смесь пластифицировали в экструдере при температуре 80 °С и гранулировали в цилиндры диаметром 2,8 мм и длиной 4–6 мм.

Термогравиметрический анализ был проведен с помощью дериватографа «Термоскан-2» в инертной среде гелия, для исключения окисления образцов. При этом высушенные измельченные образцы сырья массой 0,3±0,03 г, помещали в керамический тигель высотой 10 мм, диаметром 5 мм. Нагревание производили с 30 °С до 1000 °С, со скоростью подъема температуры 5 °С /мин. Экзотермический температурный диапазон образцов определяли на анализаторе «ZCT-1».

Медленный пиролиз растительного сырья проводили на установке, представленной в работах [1–4], при температурном режиме 450 °С, со скоростью прогрева 5 °С/мин. Процесс пиролиза длился до завершения выхода пиролизных газов, контроль выхода происходил с помощью замеров данных с мерника дистиллята и сборника газов. Установка состоит из муфельной печи, в которую помещается камера пиролиза. Конденсация пиролизных газов происходит в сепараторе. Жидкая фракция стекает в мерник дистиллята, а газ через гидрозатвор отбирается в сборник газа.

Активация карбонизатов из растительных предшественников протекает при температуре водяного пара в диапазоне 750 – 850 °С [4], Угольные гранулы подвергали процессу водопаровой активации в течении 15-70 мин в установке, представленной в работах [5–10]. Степень выгорания Υ , %, определялась как обратная величина удельной массы твердого продукта карбонизации [7].

Определение удельных масс продуктов пиролиза осуществлялось методом прямого взвешивания карбонизатов и пиролизного дистиллята. Масса газа получена сопоставлением его плотности с объемом вытесненной жидкости. Анализ параметров пористой структуры углеродных сорбентов проводился с использованием быстродействующего анализатора сорбции газов «NOVA-1200e» методом снятия изотермы адсорбции азота при температуре 77 К.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Результаты исследований по влиянию температуры активации гранулированного активированного

ного угля на характер его пористой структуры представлены в табл. 2. Соотношение сырья к связующему 8:1.

Как видно из табл. 2, активация при более низкой температуре позволяет получить более развитую микропористую структуру при этом для получения аналогичной степени выгорания с режимом 750 °С продолжительность активации должна быть увеличена. На рис. 1 представлена зависимость степени выгорания активированного угля от продолжительности активации при разных температурах.

Таблица 2

Характеристики пор активированного угля

Тип связующего	Температура, °С	Степень выгорания, %	Удельный объем микропор, см ³ /г	Удельный объем мезопор, см ³ /г	Удельный объем макропор, см ³ /г
Пиролизная смола	750	43	0,143	0,036	0,320
	850	43	0,112	0,032	0,430
Гудрон	750	45	0,139	0,035	0,300
	850	45	0,107	0,030	0,380

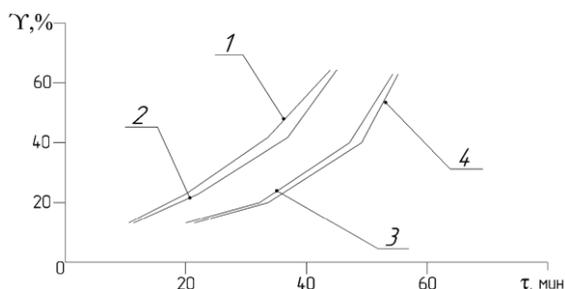


Рис. 1. Кинетическая зависимость степени выгорания активированного угля при температуре активации: 850 °С (с гудроном – 1, с пиролизной смолой – 2), 750 °С (с гудроном – 3, с пиролизной смолой – 4)

Из рис. 1 и табл. 2 видно, что вид связующего вещества не оказывает существенного влияния как на продолжительность активации, так и на структуру пор гранулированного активированного угля. Активация при более низкой температуре позволяет получить более развитую микропористую структуру при этом, для получения аналогичной степени выгорания с режимом 850 °С, продолжительность активации должна быть увеличена в среднем на 40%.

Механические характеристики гранулированного активированного угля зависят от степени выгорания гранул при их пиролизе и активации. На рис. 2 представлены ДТГ кривые термического

разложения растительных гранул при соотношении сырье – связующее вещество 8:1.

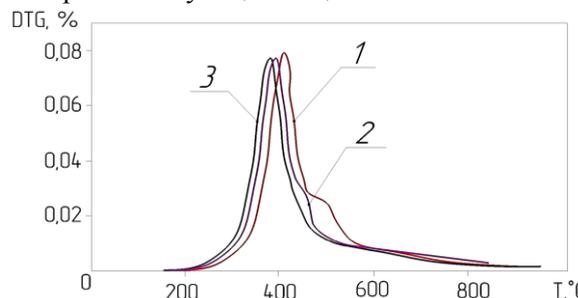


Рис. 2. Кривые скорости потери массы при термическом разложении гранул растительного сырья 1 – с гудроном; 2 – с пиролизной смолой; 3 – без связующего

Из рис. 2 видно, что связующие вещества оказывают влияние на термическое разложение гранул растительного сырья, смещая пики термической деструкции. Можно сделать вывод, что при повышении доли связующего вещества, потребуется назначение высокотемпературных режимов пиролиза.

В табл. 3 представлены результаты исследований по влиянию концентраций связующего вещества на суммарный объем пор активированного угля. Активация проводилась в течении 2 ч при температуре 750 °С.

По табл. 3 можно проследить, что с увеличением доли связующего вещества удельный выход активированного угля увеличивается. В тоже самое время заметно снижение удельного объема пор, это может быть вызвано замещением структуры растительного полимера связующим веществом.

Добавление связующего вещества для получения гранулированного активированного угля

обусловлено заданием прочностных характеристик гранул. В свою очередь, на прочность гранулы существенное влияние будет оказывать и степень выгорания при процессе активации. В таблицу 4 сведены данные по прочностным характеристикам активированного угля. Соотношение сырья к связующему 8:1.

Таблица 3

Параметры активированного угля

Тип связующего	доля связующего мас. %	Удельная масса активированного угля, после пиролиза и активации, %	Суммарный удельный объем пор, см ³ /г
Пиролизная смола	9	18	0,743
	18	22	0,711
	30	25	0,643
Гудрон	9	19	0,762
	18	23	0,698
	30	24	0,654

Таблица 4

Технологические характеристики активированного угля

Тип связующего	Степень выгорания %	Прочность на истирание, %	Суммарный удельный объем пор, см ³ /г	Насыпная плотность, см ³ /г
Пиролизная смола	32	94	0,59	0,68
	38	91	0,61	0,62
	52	87	0,78	0,54
	63	74	0,82	0,43
	74	63	0,84	0,39
Гудрон	31	96	0,57	0,72
	38	93	0,63	0,65
	52	86	0,72	0,53
	61	72	0,85	0,42
	75	62	0,83	0,42

Положительный эффект процесса активации на формирование микропористой структуры достигается благодаря воздействию активирующего агента. Водяной пар обдувает карбонизаты в результате чего мезопористая структура растрескивается и образуются микропоры, однако излишне высокая температура и избыточная длительность процесса активации может привести к поверхностному выгоранию гранул угля, в результате чего будет снижен удельный выход активированного угля.

По табл. 4 заметно как с увеличением степени выгорания активированного угля уменьшается прочность на истирание и насыпная плотность. При высокой степени выгорания (70-80%) происходит разрушение пористой структуры вследствие по-

верхностного выгорания гранулы угля. Тип связующего вещества в целом не оказывает существенного влияния на формирование пористой структуры активированного угля. Снизить влияние связующего вещества возможно уменьшением его концентрации в связуемом сырье.

В табл. 5 приведены прочностные характеристики активированного угля, полученного при постоянной степени выгорания 50±2% при различном содержании связующего вещества в исходном растительном сырье.

Из данных табл. 5 видно, что гранулы в которых связующим является гудрон обладают более высокой прочностью в соотношениях 8:1 и 10:1. Влияние на формирование пористой структуры для соотношений 6:1, 8:1 и 10:1 минимально. Высокая

концентрация связующего вещества является негативным фактором, снижающим качество пористой структуры в активированном угле. Объясняется это тем, что и гудрон и пиролизная смола состоят из тяжелолетучих компонентов, которые удаляются при пиролизе, а при высокой концентрации данных веществ происходит интенсивная дегазация, приводящая к деформации и частичному разрушению структуры карбонизата при пиролизе.

Недостатком гудрона при использовании в качестве связующего вещества в формировании гранул растительного сырья является наличие высокотоксичных соединений, которые могут не удалиться при пиролизе растительного сырья. Пиро-

лизная смола по сути является уже пиролизированным веществом и возможное неудаление тяжелолетучих компонентов исключается. Однако количество пиролизной смолы ограничено материальным балансом термического разложения и составляет примерно 12-15% от общей массы сухого растительного сырья.

Было проведено исследование адсорбционных способностей активированного угля. На рис. 3 представлены зависимости изменения адсорбционной активности по йоду для активированного угля с применением связующих веществ при различной концентрации активирующего агента – водяного пара.

Таблица 5

Прочностные характеристики гранулированного активированного угля

Тип связующего	Отношение сырья к связующему	Прочность на истирание, %	Суммарный удельный объем пор, см ³ /г
Пиролизная смола	3:1	71	0,63
	6:1	84	0,71
	8:1	90	0,73
	10:1	88	0,73
Гудрон	3:1	68	0,57
	6:1	85	0,75
	8:1	92	0,75
	10:1	94	0,76

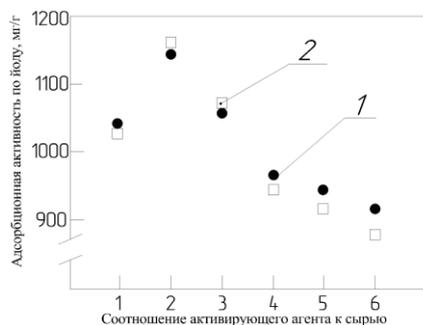


Рис. 3. Адсорбционная активность по йоду гранулированного активированного угля в зависимости концентрации активирующего агента 1 – связующее пиролизная смола; 2 – связующее гудрон

По рис. 3 видно максимальное йодное число достигается при соотношении активирующего агента к углю 2:1. Закономерностей влияния типа связующего вещества не прослеживается.

На рис. 4 представлены результаты исследований по определению адсорбционной активности по йоду в зависимости от концентрации связующего вещества в активированном угле. Степень выгорания была постоянной 50±3%, отношение водяного пара к углю 1:1, продолжительность процесса 60 мин.

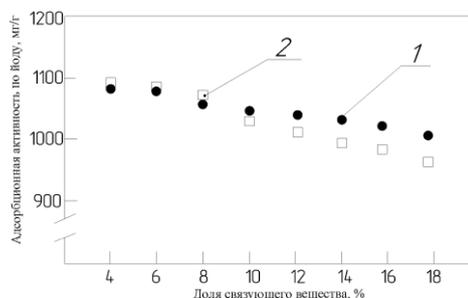


Рис. 4. Адсорбционная активность по йоду гранулированного активированного угля в зависимости концентрации связующего 1 – связующее пиролизная смола; 2 – связующее гудрон

Из приведенных кривых видно, что концентрация связующего вещества оказывает воздействие на параметры адсорбции, это можно объяснить коксуюмостью связующего вещества. Исходя из рис. 4 также можно сделать вывод, что рациональной концентрацией пиролизной смолы в виде связующего вещества будет 8-12%, а для гудрона значения концентрации будут находиться в промежутке 6-10%, поскольку его влияние на адсорбционные свойства сильнее чем у пиролизной смолы из-за высокой коксуюмости.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Термохимическим методом получены гранулированные активированные угли из растительных предшественников с применением пиролизной смолы и гудрона в качестве связующих веществ. Было проведено исследование влияния пиролизной смолы и гудрона на качественные характеристики гранулированного активированного угля. Исследованием влияния температуры активации на образование микропористой структуры установлено, что снижение температуры активации без изменения степени выгорания приводит к увеличению микропористой структуры, при этом тип связующего не оказывает существенного влияния на изменение структуры пор. Показано, что добавление связующего вещества приводит к смещению температурных пиков термического разложения в сторону увеличения температуры термического разложения. В ходе исследования влияния концентраций связующего вещества на суммарный объем пор активированного угля установлено, что минимальные концентрации связующего вещества позволяют достигнуть наибольшего объема пор в гранулах активированного угля. При увеличении концентрации связующего с 9% до 30% суммарный объем пор снизился с 0,743 до 0,643 см³/г. Также при увеличении концентрации связующего характерно повышение удельного выхода гранулировано активированного угля. В ходе исследования

прочностных характеристик гранул активированного угля установлена взаимосвязь между степенью выгорания активированного угля и прочностью гранул на истирание, показано, что при выгорании угля менее 50% значения прочности на истирание не падают ниже 87%, однако при большем выгорании угля прочность на истирание значительно снижается. Исследование концентрации связующего показало, что соотношение сырья к связующему 6-8:1 наиболее рационально, и показывает наилучшие характеристики прочности и пористости. Соотношение 10:1, также можно считать наилучшим, однако требуется тщательное перемешивание смеси. Исследования адсорбционных характеристик в зависимости от концентрации связующего показали, что гудрон оказывает наиболее сильное влияние на адсорбционные характеристики активированного угля. Наиболее рациональная концентрация связующего вещества, для получения гранул активированного угля высокой адсорбционной способности, находится в пределах 6 – 12%.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-26-00036, <https://rscf.ru/project/23-26-00036/>.

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

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

ЛИТЕРАТУРА

1. Сафин Р.Г., Сотников В.Г. Известия высших учебных заведений. Технология текстильной промышленности. 2023. № 3(405). С. 209–216. DOI: 10.47367/0021-3497_2023_3_209.
2. Сафин Р.Г., Сотников В.Г., Зиатдинова Д.Ф. Известия высших учебных заведений. Технология текстильной промышленности. 2021. № 5(395). С. 229–235. DOI: 10.47367/0021-3497_2021_5_229.
3. Сафин Р., Сотников В., Зиатдинова Д. Экология и промышленность России. 2023. 27(11). С. 9–14. DOI: 10.18412/1816-0395-2023-11-9-14.
4. Голубев Э., Суслова Е., Лебедев А. Российский химический журнал. 2023. 67(2). Р. 37–44. DOI: 10.6060/rcj.2023672.4.
5. Aleksanian K.G., Valiev A.I., Sukhareva N.M., Agadzhanian S.A. Изв. вузов. Хим. и хим. технология. 2023. 66(12). С. 25–31. DOI: 10.6060/ivkkt.20236612.6897
6. Колобов М., Воробьев С., Миронов Е., Куваева Е., Сахаров С., Колобова В. Российский химический журнал. 2023. 67(1). Р. 64–69. DOI: 10.6060/rcj.2023671.9.
7. Сафин Р.Г., Сотников В.Г. Российский химический журнал. 2023. Т. 67. № 3. С. 17–24. DOI: 10.6060/rcj.2023673.3.

REFERENCES

1. Safin R.G., Sotnikov V.G. News of higher educational institutions. Textile industry technology. 2023. N 3(405). P. 209–216. DOI: 10.47367/0021-3497_2023_3_209.
2. Safin R.G., Sotnikov V.G., Ziatdinova D.F. News of higher educational institutions. Textile industry technology. 2021. N 5(395). P. 229–235. DOI: 10.47367/0021-3497_2021_5_229.
3. Safin R., Sotnikov V., Ziatdinova D. Ecology and industry of Russia. 2023. 27(11). P. 9–14. DOI: 10.18412/1816-0395-2023-11-9-14.
4. Golubev E., Suslova E., Lebedev A. Ros. Khim. Zh. 2023. 67(2). P. 37–44. DOI: 10.6060/rcj.2023672.4.
5. Aleksanian K. G., Valiev A. I., Sukhareva N. M., Agadzhanian S. A. ChemChemTech [Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Khim. Khim. Tekhnol.]. 2023. V. 66. N 12. P. 25–31. DOI: 10.6060/ivkkt.20236612.6897.
6. Kolobov M., Vorobyov S., Mironov E., Kuvaeva E., Sakharov S., Kolobova V. Ros. Khim. Zh. 2023. 67(1). P. 64–69. DOI: 10.6060/rcj.2023671.9.
7. Safin R.G., Sotnikov V.G. Ros. Khim. Zh. 2023. V. 67. N 3. P. 17–24. DOI: 10.6060/rcj.2023673.3.
8. Samonin V., Podvyaznikov M., Spiridonova E., Khrylova E., Khokhlache S., Garabadzhiu A. Ros. Khim. Zh. 2022. 66(3). P. 61–69. DOI: 10.6060/10.6060/rcj.2022663.9.

8. Самонин В.В., Подвязников М.Л., Спиридонова Е.А., Хрылова Е.Д., Хохлачев С.П., Гарабаджиу А.В. Российский химический журнал. 2022. 66(3). С. 61–69. DOI: 10.6060/10.6060/rcj.2022663.9.
9. Чистякова Т.Б., Новожилова И.В., Мешалкин В.П., Паукин О.А. Российский химический журнал. 2022. 66(3). С. 70–78. DOI: 10.6060/10.6060/rcj.2022663.10.
10. Фарберова Е.А., Першин Е.А., Максимов А.С., Ходяшев Н.Б., Смирнов С.А., Кузьминых К.Г. Изв. вузов. Химия и хим. технология. 2023. Т. 66. Вып. 6. С. 102–110. DOI: 10.6060/ivkkt.20236606.6776.
11. Safin R.G., Sotnikov V.G., Ziatdinova D.F. Lecture Notes in Mechanical Engineering this link is disabled. 2023. P. 809–818.
12. Safin R.G., Sotnikov V.G. E3S Web Conf. 2023. 420. 07005. DOI: 10.1051/e3sconf/202342007005.
13. Safin R.G., Sotnikov V.G. E3S Web Conf. 2023. 420. 09006. DOI: 10.1051/e3sconf/202342009006.
14. Safin R.G., Ziatdinov R.R., Sotnikov V.G., Ryabushkin D.G. Russian Engineering Research this link is disabled. 2022. 42(9). P. 867–870.
15. Agraftioti E., Bouras G., Kalderis D., Diamadopoulos E. Journal of Analytical and Applied Pyrolysis. 2013. V. 101. P. 72–78.
16. Liu Z., Hughes M., Tong Y., Zhou J., Kreutter W., Valtierra D., Singer S., Zitomer D., McNamara P. Renewable Energy. 2021. V. 177. P. 1–11.
17. Bridle T.R., Pritchard D. Water Science and Technology. 2004. V. 50. P. 169–175.
18. Carey D.E., McNamara P.J., Zitomer D.H. Water Environment Research. 2015. V. 87. P. 2098–2106.
19. Lewandowski W.M., Radziemska E., Ryms M., Ostrowski P. Ecological Chemistry and Engineering S. 2011. V. 18. P. 39–47.
20. Tremel A., Becherer D., Fendt S., Gaderer M., Spliethoff H. Energy Conversion and Management. 2013. V. 69. P. 95–106.
21. Umeki K., Häggström G., Bach-Oller A., Kirtania K., Furusjö E. Energy and Fuels. 2017. V. 31. P. 5104–5110.
22. Trubetskaya A., Souihi N., Umeki K. Renewable Energy. 2019. V. 141. P. 751–759.
23. Ozkan A., Kinney K., Katz L., Berberoglu H. Bioresource Technology. 2012. V. 114. P. 542–548.
24. Uchimiya M., Wartelle L.H., Klasson T., Fortier C.A., Lima I.M. J. Agric. Food Chem. 2011. 5. P. 2501–2510.
25. Kuz'yakov Y., Subbotina I., Chen H., Bogomolova I., Xu X. Soil Biol. Biochem. 2009. 41. P. 210–219.
26. Chen J., Zhu D., Sun C. Environ. Sci. Technol. 2007. 41. P. 2536–2541.
27. Chen B., Zhou D., Zhu L. Environ. Sci. Technol. 2008. 42. P. 5137–5143.
28. Chen B., Chen Z., Lv S. Bioresour. Technol. 2011. 102. P. 716–723.
29. Chen X., Chen G., Chen L., Chen Y., Lehmann J., McBride M.B., Hay A.G. Bioresour. Technol. 2011. 102. P. 8877–8884.
9. Chistyakova T., Novozhilova I., Meshalkin V., Paukin O. Ros. Khim. Zh. 2022. 66(3). P. 70–78. DOI: 10.6060/10.6060/rcj.2022663.10.
10. Farberova E.A., Pershin E.A., Maksimov A.S., Khodyashev N.B., Smirnov S.A., Kuz'minykh K.G. ChemChemTech [Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Khim. Khim. Tekhnol.]. 2023. V. 66. N 6. P. 102–110. DOI: 10.6060/ivkkt.20236606.6776.
11. Safin R.G., Sotnikov V.G., Ziatdinova D.F. Lecture Notes in Mechanical Engineering this link is disabled. 2023. P. 809–818.
12. Safin R.G., Sotnikov V.G. E3S Web Conf. 2023. 420. 07005. DOI: 10.1051/e3sconf/202342007005.
13. Safin R.G., Sotnikov V.G. E3S Web Conf. 2023. 420. 09006. DOI: 10.1051/e3sconf/202342009006.
14. Safin R.G., Ziatdinov R.R., Sotnikov V.G., Ryabushkin D.G. Russian Engineering Research this link is disabled. 2022. 42(9). P. 867–870.
15. Agraftioti E., Bouras G., Kalderis D., Diamadopoulos E. Journal of Analytical and Applied Pyrolysis. 2013. V. 101. P. 72–78.
16. Liu Z., Hughes M., Tong Y., Zhou J., Kreutter W., Valtierra D., Singer S., Zitomer D., McNamara P. Renewable Energy. 2021. V. 177. P. 1–11.
17. Bridle T.R., Pritchard D. Water Science and Technology. 2004. V. 50. P. 169–175.
18. Carey D.E., McNamara P.J., Zitomer D.H. Water Environment Research. 2015. V. 87. P. 2098–2106.
19. Lewandowski W.M., Radziemska E., Ryms M., Ostrowski P. Ecological Chemistry and Engineering S. 2011. V. 18. P. 39–47.
20. Tremel A., Becherer D., Fendt S., Gaderer M., Spliethoff H. Energy Conversion and Management. 2013. V. 69. P. 95–106.
21. Umeki K., Häggström G., Bach-Oller A., Kirtania K., Furusjö E. Energy and Fuels. 2017. V. 31. P. 5104–5110.
22. Trubetskaya A., Souihi N., Umeki K. Renewable Energy. 2019. V. 141. P. 751–759.
23. Ozkan A., Kinney K., Katz L., Berberoglu H. Bioresource Technology. 2012. V. 114. P. 542–548.
24. Uchimiya M., Wartelle L.H., Klasson T., Fortier C.A., Lima I.M. J. Agric. Food Chem. 2011. 5. P. 2501–2510.
25. Kuz'yakov Y., Subbotina I., Chen H., Bogomolova I., Xu X. Soil Biol. Biochem. 2009. 41. P. 210–219.
26. Chen J., Zhu D., Sun C. Environ. Sci. Technol. 2007. 41. P. 2536–2541.
27. Chen B., Zhou D., Zhu L. Environ. Sci. Technol. 2008. 42. P. 5137–5143.
28. Chen B., Chen Z., Lv S. Bioresour. Technol. 2011. 102. P. 716–723.
29. Chen X., Chen G., Chen L., Chen Y., Lehmann J., McBride M.B., Hay A.G. Bioresour. Technol. 2011. 102. P. 8877–8884.

Поступила в редакцию 08.02.2024
Принята к опубликованию 18.04.2024

Received 08.02.2024
Accepted 18.04.2024