

УДК 67.05: 66.040.287

DOI 10.47367/0021-3497_2021_5_229

**ПИРОГЕНЕТИЧЕСКАЯ ПЕРЕРАБОТКА ОРГАНИЧЕСКИХ ОТХОДОВ
ТЕКСТИЛЬНОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ В АДсорбЕНТЫ***

**TEXTILE INDUSTRY ORGANIC WASTE
PYROGENETIC PROCESSING INTO ADSORBENTS**

Р.Г. САФИН, В.Г. СОТНИКОВ, Д.Ф. ЗИАТДИНОВА

R.G. SAFIN, V.G. SOTNIKOV, D.F. ZIATDINOVA

(Казанский национальный исследовательский технологический университет)

(Kazan National Research Technological University)

E-mail: vcvcvc12345678@gmail.com

В работе проведено исследование по кондуктивному пиролизу отходов тканевых материалов и резино-технических изделий в установке производства активированного угля. Представлена математическая модель процесса термохимического разложения отходов тканей: льна, хлопка и синтетики на углерод и пиролизные газы, служащие топливом для установки производства активированного угля. Приведена зависимость изменения температуры сырья в камере пиролиза для различных отходов текстильной промышленности, описывающая конвективный теплообмен, происходящий между насыпным слоем отходов и стенкой камеры пиролиза, и кинетические зависимости изменения удельной массы сырья и продуктов реакций в камере пиролиза, характеризующие массообмен при термохимическом превращении отходов в углеродистый остаток. Совместное решение уравнений тепломассопереноса описывает динамику нагрева отходов и изменения удельной массы твердых фракций и парогазовой смеси при разложении отходов. Проанализированы конечные характеристики углеродных адсорбентов, полученных при переработке текстильных отходов в установке производства активированного угля, позволяющие сделать вывод о целесообразности термохимической переработки отходов текстильного производства в активированный уголь.

In the article under review, a study was carried out on the conductive pyrolysis of waste fabric materials and rubber products in an activated carbon production unit. A mathematical model of the tissue waste process thermochemical decomposition: flax, cotton and synthetics into carbon and pyrolysis gases serving as fuel

*Работа выполнена с использованием оборудования ЦКП «Нанотехнологии и наноматериалы» ФГБОУ ВО КНИТУ.

*The study was carried out using the equipment of the Center for Collective Use “Nanomaterials and Nanotechnology” of the Kazan National Research Technological University.

for an activated carbon production unit, is presented. The dependence of the change in the temperature of the raw material in the pyrolysis chamber for various wastes of the textile industry is given, the latter describes the convective heat transfer between the bulk layer of the waste and the wall of the pyrolysis chamber, and the kinetic dependences of the change in the specific gravity of the raw material and reaction products in the pyrolysis chamber characterizing the mass transfer during the thermochemical conversion of wastes into a carbonaceous residue. ... The joint solution of the heat and mass transfer equations describes the dynamics of waste heating and changes in the specific mass of the solid fraction and steam-gas mixture during waste decomposition. The final characteristics of carbon adsorbents obtained during the processing of textile waste in an activated carbon production unit have been analyzed, which make it possible to draw a conclusion about the advisability of thermochemical processing of textile waste into activated carbon.

Ключевые слова: активированный уголь, отходы текстильной промышленности, кондуктивный пиролиз, теплоперенос, массоперенос, ресурсосбережение, энергосбережение.

Keywords: activated carbon, waste of the textile industry, conductive pyrolysis, heat transfer, mass transfer, resource-saving, energy saving.

Введение

Интенсивное развитие научно-технического прогресса и бурный рост народонаселения за последнее столетие привели к тому, что в мире накопилось колоссальное количество отходов. Весомая часть вновь образующихся отходов приходится на текстильные отходы легкой промышленности. Такие отходы образуются в огромных количествах и не всегда принимаются перерабатывающими организациями. Они вывозятся для захоронения, тем самым ухудшая экологическое состояние планеты [1], [2].

Отходы текстильной промышленности можно разделить на 2 группы: непосредственно текстиль натуральный и химический и применяемые при производстве органические отходы (резино-технические изделия (РТИ)), которые также образуются в больших количествах на производствах текстильной промышленности. Данные отходы можно пирогенетически переработать, получив активированный уголь с высокими адсорбционными свойствами [3], [4].

Пирогенетическая переработка или пиролиз отходов – это высокотемпературный процесс разложения отходов без доступа

кислорода на пиролизный газ и твердый углеродистый остаток. Герметичность процесса позволяет исключить выбросы вредных веществ в атмосферу и получить при этом востребованные продукты, такие как активированный уголь, горючие газы и дистиллят – жидкое топливо.

Выбор натурального текстиля в качестве сырья для производства активированного угля обусловлен высоким содержанием целлюлозы, гемицеллюлозы и лигнина – суммарно до 99%. РТИ и синтетические ткани также станут хорошим сырьем для получения активированного угля, по химическому составу это углерод с примесями, то есть при их пирогенетическом разложении получится сухой остаток – уголь, био- нефть, а также горючие газы [3...5].

Из выше изложенного можно сделать вывод, что отходы текстильной промышленности можно выгодно переработать в адсорбенты, с извлечением жидкого и газообразного топлива. В связи с этим в работе поставлена задача исследования пирогенетической переработки текстильных отходов, таких как ткани льна, хлопка, синтетики, РТИ.

Методы и материалы.

На кафедре переработки древесных материалов Казанского национального исследовательского технологического университета была разработана энерго- и ресурсосберегающая непрерывно действующая установка, предназначенная для производства активированного угля [6...8].

Установка устроена по принципу кондуктивного пиролиза. Топливом для работы установки служит неконденсирующийся газ, получаемый при разложении отходов. На рис. 1 представлена схема установки переработки отходов в активированный уголь [9].

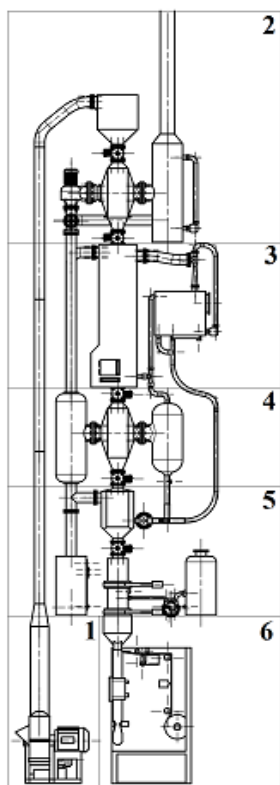


Рис. 1

Конструктивно установка представляет собой вертикальную реторту, где измельченные в зоне 1 отходы непрерывно движутся сверху вниз и по мере прохождения зон сушки 2, пиролиза 3, активации 4, охлаждения 5, укупорки 6 превращаются в ценный продукт – активированный уголь.

Перед пирогенетическим разложением тканевых отходов их сушат в зоне сушки топочными газами при температуре 150...270°C. Длительность процесса сушки определяется видом и размерами отходов. Высушен-

ные отходы перемещаются через шлюзовый питатель в пиролизную камеру.

Пиролиз в установке производства активированного угля происходит при температуре 500°C, при данной температуре выход сухого остатка максимален. В камере пиролиза происходят активные тепло- и массообменные процессы, осложненные химическими реакциями. Перенос тепла при разложении текстильных отходов можно описать дифференциальным уравнением Фурье [10], [11]:

$$W_M \rho_{\text{сл}} c_M \frac{\partial T_{\text{сл}}}{\partial h} = \frac{\partial T_{\text{сл}}}{\partial \ell} \left(\lambda_{\text{сл}} \frac{\partial T_{\text{сл}}}{\partial \ell} \right) + q_{\text{xp}}, \quad (1)$$

где $\rho_{\text{сл}}$ – насыпная плотность частиц [кг/м³]; c_M – теплоемкость материала [Дж/(кг·К)]; $T_{\text{сл}}$ – температура слоя [С°]; h, ℓ – координата, соответственно высоты слоя и расстояния до греющей поверхности [м]; $\lambda_{\text{сл}}$ – эффективный коэффициент теплопроводности слоя материала [Вт/(м·К)] – зависит от порозности слоя, температуры, скорости движения биомассы в зоне пиролиза, его значение определяется экспериментальным путем; W_M – скорость движения отходов по пиролизной зоне [м/с].

Сток (приток) тепла за счет химических реакций q_{xp} [Дж/(м²·с)] рассчитывается по выражению:

$$q_{\text{xp}} = \sum_i^n q_{i=1} (-k_i \rho_i),$$

где q_i – удельная теплота превращения i компонента [Дж/кг]; k_i – константа скорости i химической реакции [1/с].

Схема крайних условий для решения уравнения (1) представлена на рис. 2.

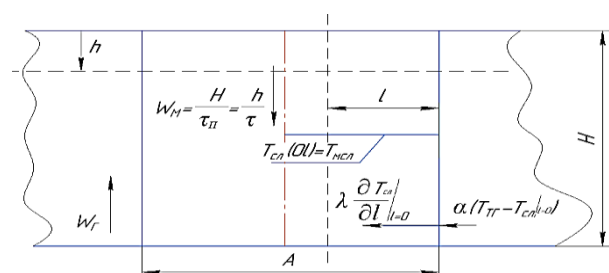


Рис. 2

Начальная температура слоя определяется конечной температурой материала после сушки соотношением:

$$T_{сл}(0,1) = T_{мс}.$$

Температура слоя материала, соприкасающегося с теплоподводящей поверхностью, определяется граничным условием третьего рода:

$$-\lambda_{ск} \frac{\partial T_{сл}}{\partial h} \Big|_{\ell=0} = \alpha(T_{г} - T_{сл} \Big|_{\ell=0}),$$

где $T_{г}$ – температура топочного газа [$^{\circ}\text{C}$]; α – коэффициент теплоотдачи [$\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot ^{\circ}\text{C})$] – определяется из решения критериального уравнения для турбулентного движения потока.

Условие симметрии запишется соотношением:

$$\frac{\partial T_{сл}}{\partial \ell} \Big|_{\ell=\frac{A}{2}} = 0.$$

При разложении текстиля, РТИ и синтетики образуются уголь и парогазовая смесь. Кинетику процесса можно записать отдельно для перерабатываемого сырья, угля и парогазовой смеси.

- для сырья

$$\frac{\partial \rho_c}{\partial \tau} = -k_c \rho_c, \quad (2)$$

- для угля

$$\frac{\partial \rho_y}{\partial \tau} = \phi k_c \rho_c, \quad (3)$$

- для парогазовой смеси

$$\frac{\partial \rho_{пг}}{\partial \tau} = (1 - \phi) k_c \rho_c, \quad (4)$$

доля угля в пиролизуемой частице ϕ определяется соотношением:

$$\phi = \rho_y / \rho_c.$$

Начальные условия для уравнений (2)...(4) определяются начальными концентрациями: удельная масса сырья равна плотности абсолютно сухого сырья.

Удельная масса угля и парогазовой смеси равна нулю.

Совместное решение дифференциальных уравнений (1), (6)...(8) при соответствующих краевых условиях описывает динамику тепло- и массообменных процессов в пиролизуемом сырье.

Результаты и обсуждения

Описанная выше математическая модель изменения температуры и удельной массы текстильных отходов и продуктов реакции может быть использована для определения режимов процесса пиролиза в установке производства активированного угля.

В ходе совместного решения уравнений тепло- и массопереноса представленной выше математической модели получены расчетные зависимости изменения температуры сырья в камере пиролиза (рис. 3 – кинетическая зависимость температуры сырья в центре образца (1 – резина, 2 – синтетическая ткань, 3 – льняная ткань, 4 – хлопковая ткань)) и зависимость изменения удельной массы сырья в камере пиролиза (рис. 4 – кинетическая зависимость удельной массы сырья в камере пиролиза (1 – резина, 2 – синтетическая ткань, 3 – льняная ткань, 4 – хлопковая ткань)).

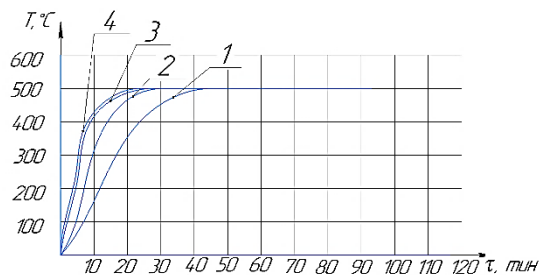


Рис. 3

Кривые на рис. 3 показывают скорость прогрева отходов до температуры протекания процесса пиролиза в 500°C в центре образца. Из зависимости видно, что прогрев тканей занимает гораздо меньшее время, чем прогрев резины.

Анализируя зависимость изменения удельной массы сырья в камере пиролиза, видно, что для разложения РТИ требуется гораздо больше времени, чем для разложе-

ния тканевых материалов, но выход углеродистого остатка выше в 1,5... 2 раза.

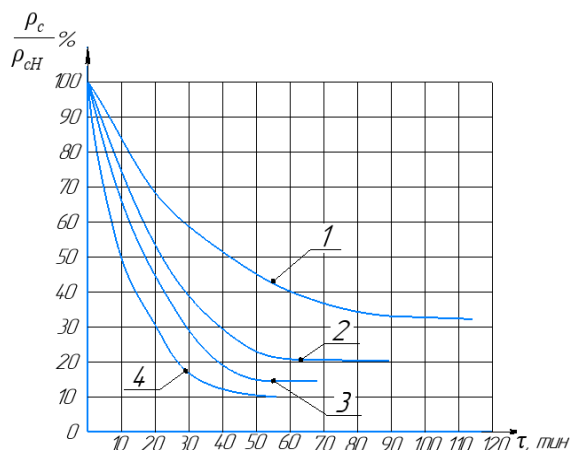


Рис. 4

Зависимости (рис. 3) и (рис. 4) позволяют определить продолжительность процесса пиролиза, если кривая температуры описывает начальную стадию процесса пиролиза в период прогрева, то кривые изменения удельной массы твердой фракции указывают на продолжительность

процесса при постоянной температуре. Как можно увидеть на рис. 4, изменение удельной массы твердого остатка льняной ткани прекращается на 55 мин стабильного процесса, то есть сопоставив графики рис. 3 и 4, можно сделать вывод, что процесс пиролиза для отходов из льняной ткани составит 70 мин. Кинетические зависимости температуры и изменения удельной массы сырья в камере пиролиза дают полное представление о скорости термохимического разложения отходов текстильной промышленности.

После пиролиза углеродистый остаток проходит через зону активации, затем две стадии охлаждения.

Полученный в установке производства активированного угля адсорбент из отходов текстильной промышленности соответствует ГОСТ 6217–74 [10], [11]. Основные характеристики промышленных адсорбентов, полученных при переработке различных отходов текстильной промышленности, представлены в табл. 1.

Таблица 1

№	Тип отхода	Адсорбционная активность по йоду, %	Объем пор, см ³ /г	Удельная поверхность, м ² /г
1	РТИ	60	1,7	1100
2	Синтетическая ткань	45	1,4	875
3	Льняная ткань	42	1,2	830
4	Хлопковая ткань	42	1,2	830

Наилучшими показателями по сорбционным свойствам обладают адсорбенты, полученные при переработке РТИ, адсорбенты из тканевых отходов также обладают высокими сорбционными свойствами и полностью соответствуют требованиям для адсорбентов марок ДАК и БАУ-МФ, которые широко применяются для адсорбции различных примесей из жидких и газовых сред, при высоком ресурсе работы.

ВЫВОДЫ

Пирогенетическая переработка отходов текстильной промышленности по энерго- и ресурсосберегающей технологии позволяет получить полезные для различных отраслей промышленности адсорбенты и со-

путствующие продукты: дистиллят и горючий газ.

Исследования, проведенные в работе, четко отражают экономическую целесообразность термохимической переработки тканевых отходов текстильной промышленности в активированный уголь. Адсорбенты, полученные в установке производства активированного угля, имеют характеристики, удовлетворяющие государственным стандартам.

ЛИТЕРАТУРА

1. Герасимович Е.М. Композиционные материалы на основе отходов – материалы будущего //Высшая школа. – 2016. Т.1, №4. С.101...103.
2. Kaldygozov A., Kaldygozov E., Idrisov M., Sarsenbaeva A. Ways of improving operational and

environmental properties of motor fuels from petroleum raw materials of Kazakhstan // *Industrial Technology and Engineering*. – №03 (24), 2017. P.18...24.

3. Демесинова А.А., Айдарова А.Б., Молдогазиева Г.М., Досмуратова Э.Е. Энергия из отходов текстильного производства // *Изв. вузов. Технология текстильной промышленности*. – 2019, № 1. С.71...75.

4. Пукашева Г.Н., Коробкова А.Ю. Анализ возможностей получения угольных адсорбентов из отходов синтетических тканей. Особенности химии поверхности угольных адсорбентов // *Проблемы и решения теоретических и прикладных задач сервисных технологий*. – М.: МГУС, 2006. С.92...98.

5. Хомутов А.Н. Основы технологии активных углей из отходов полиуретанполиамидных тканей и торфа: Дис.... канд. техн. наук. – М.: РХТУ им. Менделеева, 2005.

6. Сафин Р.Г., Степанова Т.О., Зиятдинов Р.Р., Рябушкин Д.Г., Петров В.И., Сотников В.Г. Конструктивный расчет пиролизной зоны установки производства активированного угля // *Деревообрабатывающая промышленность*. – 2020, №3. С.45...55.

7. Timerbaev N.F., Safin R.G., Mazarov I.Yu., Stepanova T.O. Thermochemical processing of organic waste IOP Conference Series/ Materials Science and Engineering. – 643. 2019.

8. Safin R.G., Prosvimikov D.V., Stepanova T.O. Processing of Renewable Wood Biomass into Thermally Modified Pellets with Increased Combustion Value // 2020 Proceedings of the 5 th international Conference on Industrial Engineering: Lecture Notes in Mechanical Engineering 387.

9. Патент РФ № 2694347, 11.07.201 МПК С 10 В 53/00. Способ получения активированного угля.

10. Tuntsev D.V., Safin R.G., Hismatov R.G., Halitov R.A., Petrov V.I. The mathematical model of fast pyrolysis of wood waste // In 2015 Int. Conf. on Mechanical Engineering, Automation and Control Systems (MEACS). P. 1...4.

11. Timerbaev N.F., Safin R.R., Safin R.G., Ziatdinova D.F. Modeling of the process of energy-technological treatment of wood waste by method of direct-flow gasification // *Journal of Engineering and Applied Sciences*. – 9(5), 2014. P. 141...146.

12. Nizam N.U.M., Hanafiah M.M., Mahmoudi E., Halim A.A., Mohammad A.W. The removal of anionic and cationic dyes from an aqueous solution using biomass-based activated carbon // *Scientific Reports*. – 11(1), 2021. P. 205...220. doi.org/10.1038/s41598-021-88084-z

13. Filho A.V., et al. Optimization of cationic dye removal using a high surface area-activated carbon from water treatment sludge // *Bulletin of Materials Science*. – 44(1), 2021. P. 41. doi.org/10.1007/s12034-020-02333-x

14. Manigomba J.A. et al. Prospects for biomass energy use in the republic of Burundi // *International*

Journal of Mechanical Engineering and Technology (IJMET). – 10, 2019. P. 1371...1382.

15. Antal M.J., et al. Biomass pyrolysis: a review of the literature. Part I. Carbohydrate pyrolysis // *In solat Energy*. – 2021, 1983. P.61...111. doi.org/10.1007/978-1-4684-8992-7_3

16. Mettler M.S., Vlachos D.G., Dauenhauer P.J. Top ten fundamental challenges of biomass pyrolysis for biofuels // *Energy Environ Sci*. – 2021, 2012(5). P.97...809.

17. Sadrtidinov A.R. et al. Modeling of thermal treatment of wood waste in the gasifiers. Proceedings of 2015 International Conference on Mechanical Engineering, Automation and Control Systems, MEACS 2015. – 2015, 7414914.

REFERENCES

1. Gerasimovich E.M. Kompozitsionnye materialy na osnove otkhodov – materialy budushchego // *Vysshaya shkola*. – 2016. T.1, №4. S.101...103.

2. Kaldygozov A., Kaldygozov E., Idrisov M., Sarsenbaeva A. Ways of improving operational and environmental properties of motor fuels from petroleum raw materials of Kazakhstan // *Industrial Technology and Engineering*. – №03 (24), 2017. P. 18...24.

3. Demesinova A.A., Aydarova A.B., Moldogazieva G.M., Dosmuratova E.E. Energiya iz otkhodov tekstil'nogo proizvodstva // *Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii, Seriya Tekhnologiya Tekstil'noi Promyshlennosti*. – 2019, № 1. S.71...75.

4. Pukasheva G.N., Korobkova A.Yu. Analiz vozmozhnostey polucheniya ugol'nykh adsorbentov iz otkhodov sinteticheskikh tkaney. Osobennosti khimii poverkhnosti ugol'nykh adsorbentov // *Problemy i resheniya teoreticheskikh i prikladnykh zadach servisnykh tekhnologiy*. – М.: МГУС, 2006. S. 92...98.

5. Khomutov A.N. Osnovy tekhnologii aktivnykh ugley iz otkhodov poliuretanpoliamidnykh tkaney i torfa: Дис.... канд. tekhn. nauk. – М.: RKhTU im. Mendeleeva, 2005.

6. Safin R.G., Stepanova T.O., Ziatdinov R.R., Ryabushkin D.G., Petrov V.I., Sotnikov V.G. Konstruktivnyy raschet piroliznoy zony ustanovki proizvodstva aktivirovannogo uglya // *Derevoobrabatyvayushchaya promyshlennost'*. – 2020, №3. S.45...55.

7. Timerbaev N.F., Safin R.G., Mazarov I.Yu., Stepanova T.O. Thermochemical processing of organic waste IOP Conference Series/ Materials Science and Engineering. – 643. 2019.

8. Safin R.G., Prosvimikov D.V., Stepanova T.O. Processing of Renewable Wood Biomass into Thermally Modified Pellets with Increased Combustion Value // 2020 Proceedings of the 5 th international Conference on Industrial Engineering: Lecture Notes in Mechanical Engineering 387.

9. Патент РФ № 2694347, 11.07.201 МПК С 10 В 53/00. Способ получения активированного угля.

10. Tuntsev D.V., Safin R.G., Hismatov R.G., Halitov R.A., Petrov V.I. The mathematical model of fast pyrolysis of wood waste // In 2015 Int. Conf. on Me-

chanical Engineering, Automation and Control Systems (MEACS). P. 1...4.

11. Timerbaev N.F., Safin R.R., Safin R.G., Ziatdinova D.F. Modeling of the process of energy-technological treatment of wood waste by method of direct-flow gasification // *Journal of Engineering and Applied Sciences*. – 9(5), 2014. P. 141...146.

12. Nizam N.U.M., Hanafiah M.M., Mahmoudi E., Halim A.A., Mohammad A.W. The removal of anionic and cationic dyes from an aqueous solution using biomass-based activated carbon // *Scientific Reports*. – 11(1), 2021. P. 205...220. doi.org/10.1038/s41598-021-88084-z

13. Filho A.V., et al. Optimization of cationic dye removal using a high surface area-activated carbon from water treatment sludge // *Bulletin of Materials Science*. – 44(1), 2021. P. 41. doi.org/10.1007/s12034-020-02333-x

14. Manigomba J.A. et al. Prospects for biomass energy use in the republic of Burundi // *International*

Journal of Mechanical Engineering and Technology (IJMET). – 10, 2019. P. 1371...1382.

15. Antal M.J., et al. Biomass pyrolysis: a review of the literature. Part I. Carbohydrate pyrolysis // *In solat Energy*. – 2021, 1983. P. 61...111. doi.org/10.1007/978-1-4684-8992-7_3

16. Mettler M.S., Vlachos D.G., Dauenhauer P.J. Top ten fundamental challenges of biomass pyrolysis for biofuels // *Energy Environ Sci*. – 2021, 2012(5). P.97...809.

17. Sadrtidinov A.R. et al. Modeling of thermal treatment of wood waste in the gasifiers. Proceedings of 2015 International Conference on Mechanical Engineering, Automation and Control Systems, MEACS 2015. – 2015, 7414914.

Рекомендована кафедрой переработки древесных материалов. Поступила 01.10.21.
