

УДК 66.092-977

DOI: 10.17238/issn0536-1036.2019.1.153

МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛОМАССОПЕРЕНОСА В ПИРОЛИЗНОЙ ЗОНЕ

А.В. Сафина, канд. техн. наук, доц.

Н.Ф. Тимербаев, д-р техн. наук, проф.

Д.Ф. Зиятдинова, д-р техн. наук, проф.

Р.Г. Сафин, д-р техн. наук, проф.

А.Р. Хабибуллина, ассистент

Казанский национальный исследовательский технологический университет,

ул. К. Маркса, д. 68, г. Казань, Республика Татарстан, Россия, 420015;

e-mail: cfaby@mail.ru, cpekgeu@gmail.com, ziatdinova2804@gmail.com, safin@kstu.ru,

almira-h@rambler.ru

В настоящее время в стране заготавливается около 200 млн м³ древесины. При этом на всех стадиях процесса (от заготовки до переработки древесного сырья) образуется большое количество отходов, которые не находят применения и оказывают отрицательное воздействие на окружающую среду. Одним из возможных направлений переработки таких отходов является их пиролиз. Выход продуктов пиролиза зависит от внешних условий и свойств сырья. Приведено описание установки, разработанной для производства активированного угля из древесной щепы. Установка выполнена в виде шахты, в ней имеется зона пиролиза, работающая в периодическом режиме. В нижней части пиролизной зоны расположены нагревательные элементы, прогревающие технологическую щепу до начала интенсивных экзотермических реакций. Нагревательным элементам тепловая энергия передается с помощью тепловой трубы, размещенной в древесном угле после стадии активации, имеющей температуру около 800 °С. С использованием этой установки из древесных отходов получают ценные продукты, пользующиеся большим спросом в промышленности, и решается экологическая проблема многих деревоперерабатывающих предприятий – утилизация отвалов. На основе анализа физической картины и формализации процесса пиролиза в установке производства активированного угля разработана математическая модель процесса, позволяющая рассчитать общее время, затраченное на переработку древесных отходов, и основные конструктивные параметры установки.

Ключевые слова: математическая модель, тепломассоперенос, древесный уголь, пиролиз, активация, газовый поток.

Введение

Проблемами деревообработки на современном этапе являются низкая эффективность использования древесного сырья, высокие энергозатраты на переработку вторичных биоресурсов, связанные с отсутствием энергосберегающего оборудования и методик для его расчета. К существующим перспективным направлениям переработки древесных отходов относится термохимическое с получением активированного угля [2, 3, 6, 7].

Для цитирования: Сафина А.В., Тимербаев Н.Ф., Зиятдинова Д.Ф., Сафин Р.Г., Хабибуллина А.Р. Моделирование тепломассопереноса в пиролизной зоне // Лесн. журн. 2019. № 1. С. 153–160. (Изв. высш. учеб. заведений). DOI: 10.17238/issn0536-1036.2019.1.153

При термохимической переработке протекают взаимосвязанные процессы тепломассопереноса, осложненные химическими превращениями, состоящими из множества параллельно протекающих реакций, в которых эндотермические процессы со стоком тепловой энергии сменяются экзотермическими [1, 12, 13].

Вопросам пирогенетической переработки древесных материалов посвящены исследования отечественных и зарубежных ученых.

В связи с повышенной сложностью процессов, происходящих при термическом разложении древесины, отсутствуют единые методы расчетов технологических процессов и аппаратов непрерывной пирогенетической технологии переработки древесных отходов в активированный уголь.

Объекты и методы исследования

На кафедре переработки древесных материалов Казанского национально-исследовательского технологического университета создана установка для переработки древесных отходов в активированный уголь (см. рисунок) [1, 5].

Установка состоит из вертикальной реторты 2, в которой за счет гравитационных сил происходит движение древесных отходов через зоны предварительного нагрева 3, сушки 4, пиролиза 5, активирования 7, охлаждения 9, 10 с превращением отходов в активированный уголь, системы сепарации пиролизных газов, топочное устройство 22, системы газоочистки 21, рекуперативные теплообменники 8, 14. Готовый продукт охлаждается в две ступени: на первой ступени тепло от активированного древесного угля отводится с помощью тепловой трубы 6 на нагрев древесных частиц в зонах пиролиза 5 и предварительного нагрева 3.

При сепарации в конденсаторах смешения 15, 23 пиролизные газы разделяются на высоко- и низкокипящие фракции. Неконденсирующиеся газы сжигаются в топке 22. Тепловая энергия топочных газов расходуется на производство перегретого пара для проведения процессов сушки древесных частиц и активации угля. Окислитель перед подачей в топку подогревается за счет конвективного охлаждения активированного угля на второй ступени и кондуктивного охлаждения топочного газа в рекуперативном теплообменнике 8. Для охлаждения хладагента в конденсаторах смешения используют отработанный абсорбент из насадочной колонны 21.

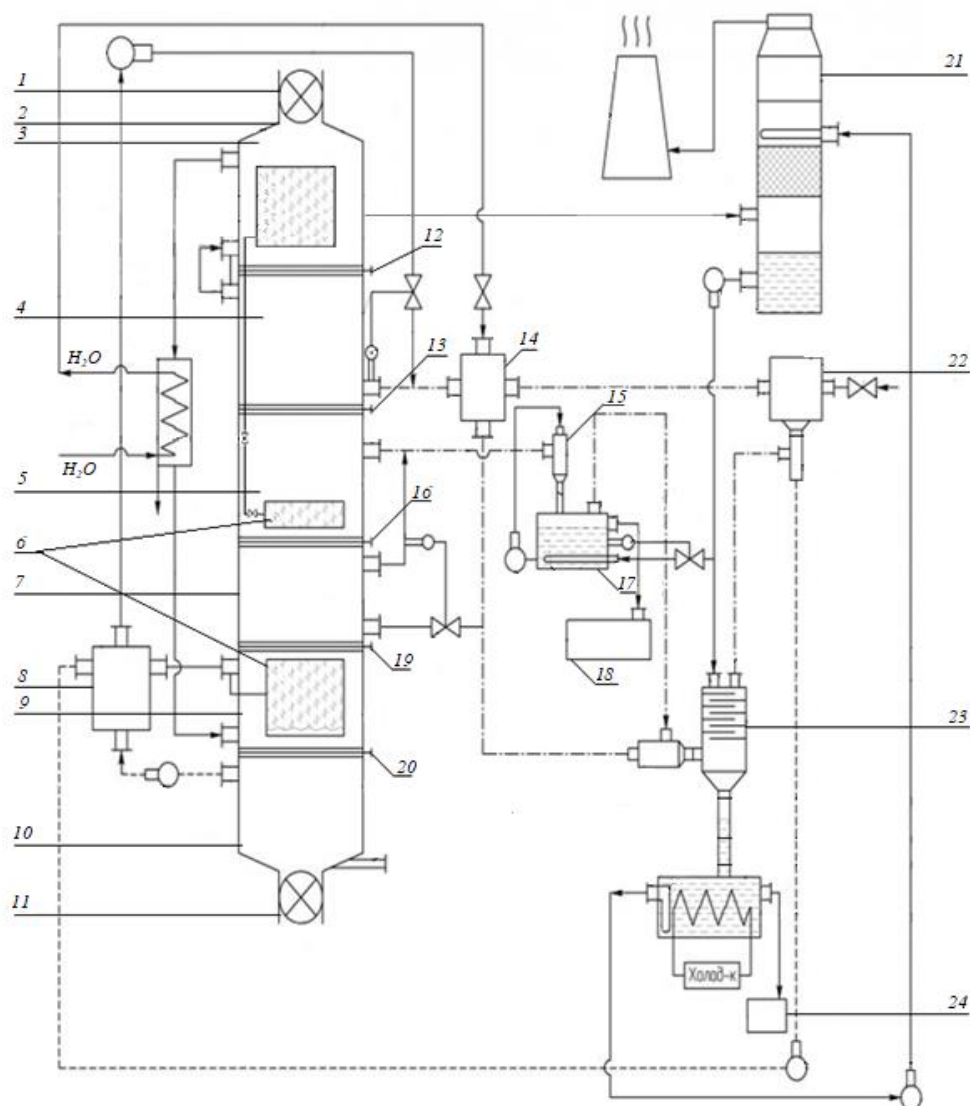
Технологические зоны реторты 3, 4, 5, 7, 9, 10 разделены шиберными заслонками 12, 13, 16, 19, 20 и изолированы от окружающей среды секционными питателями 1, 11.

В разделительном аппарате 17 жижка охлаждается отработанным абсорбентом и паровая фаза пиролизных газов разделяется на смесь высоко- и низкокипящих компонентов.

Сжиженные высококипящие компоненты с температурой кипения более 100 °С собираются в емкость 18, а обезвоженные низкокипящие компоненты (температура кипения менее 100 °С) – в емкость 24.

Для запуска установки и поддержания требуемого теплового баланса предусмотрена подача в топку природного газа.

В результате активирования свободная поверхность древесного угля увеличивается от 100...150 м²/г до 600...900 м²/г, что приводит к возрастанию сорбционной активности готового продукта [1, 2].



Установка для производства активированного угля
Activated carbon plant

Результаты исследования и их обсуждение

Математически процесс пиролиза в установке описан нами следующим образом.

Температурное поле в технологических зонах установки определяется уравнением теплопереноса [8, 10, 11], которое описывает изменение во времени (τ) температуры материала по слоям [1, 4, 6]. Для одномерного слоя имеем:

$$\rho_{\text{сл}} c_{\text{сл}} \frac{\partial T_{\text{сл}}}{\partial \tau} = \frac{\partial T_{\text{сл}}}{\partial h} \left(\lambda_{\text{эф}} \frac{\partial T_{\text{сл}}}{\partial h} \right) + q_{\text{сл}}, \quad (1)$$

где $\rho_{\text{сл}}$ – насыпная плотность слоя материала, $\text{кг}/\text{м}^3$; $c_{\text{сл}}$ – теплоемкость насыпного слоя материала, $\text{Дж}/(\text{кг} \cdot \text{К})$; $T_{\text{сл}}$ – температура слоя, $^{\circ}\text{C}$; h – координата частицы в слое, м ; $\lambda_{\text{эф}}$ – эффективный коэффициент теплопроводности слоя

материала, Вт/(м·К); $q_{\text{сл}}$ – удельный поток тепла, Дж/м²·с, определяемый прогревом материала и протекающими химическими реакциями, $q_{\text{сл}} = q_{\text{п}} + q_{\text{хр}}$; $q_{\text{п}}$ – сток тепла на прогрев материала, Дж/(м²·с); $q_{\text{хр}}$ – сток (приток) тепла за счет химических реакций, Дж/(м²·с) [1, 4, 6].

Решение дифференциального уравнения (1) проводится при следующих краевых условиях:

$$T_{\text{сл}}(0; h) = T_{\text{н}};$$

$$T_{\text{сл}}(\tau; 0) = T_{\text{п}}.$$

Здесь $T_{\text{н}}$ – начальная температура в слое, определяется конечной температурой материала после предыдущей зоны; $T_{\text{п}}$ – температура теплоподводящих поверхностей, определяется текущей температурой на границе слоя материала.

При температуре более 180 °С начинается термохимическое разложение древесины с образованием угля, парогазовой смеси и убылью массы древесины.

Изменение массы в единице объема для каждого из перечисленных компонентов можно записать в следующем виде [1, 4, 6]:

для древесины

$$\frac{\partial \rho'_{\text{др}}}{\partial \tau} = -k_{\text{др}} \rho'_{\text{др}}; \quad (2)$$

для угля

$$\frac{\partial \rho'_y}{\partial \tau} = \varphi k_{\text{др}} \rho'_{\text{др}}; \quad (3)$$

для парогазовой смеси

$$\frac{\partial \rho'_{\text{пр}}}{\partial \tau} = (1 - \varphi) k_{\text{др}} \rho'_{\text{др}}, \quad (4)$$

где $\rho'_{\text{др}} = \frac{m_{\text{др}}}{V_0}$ – удельная масса древесины в пиролизной зоне, кг/м³; $\rho'_y = \frac{m_y}{V_0}$ –

удельная масса угля в пиролизной зоне, кг/м³; $\rho'_{\text{пр}} = \frac{m_{\text{пр}}}{V_0}$ – удельная масса об-

разовавшихся пирогазов, кг/м³; $m_{\text{др}}$, m_y и $m_{\text{пр}}$ – масса древесины, угля и пирогазов; $k_{\text{др}}$ – константа скорости химической реакции разложения древесины, с⁻¹.

Степень пиролиза определяется как

$$\varphi = \frac{\rho'_y}{\rho'_y + \rho'_{\text{др}0}}.$$

Изменение массы парогазовой фазы пиролизной зоны найдем по сумме массовых потоков за счет конвекции и реакций термического разложения древесины [1, 4, 6]:

$$\frac{\partial(\varepsilon \rho'_{\text{пр}})}{\partial \tau} = - \frac{\partial(w_{\text{пр}} \rho'_{\text{пр}})}{\partial h} + (1 - \varphi) k_{\text{др}} \rho'_{\text{др}}, \quad (5)$$

где ε – пористость частицы, м³/м³,

$$\varepsilon = 1 - \frac{m_{\text{др}}(1 - \varepsilon_{\text{др}})}{m_{\text{др}0}}.$$

Для определения скорости потока газов воспользуемся законом Дарси:

$$w_{\text{пр}} = -\frac{K_{\text{ч}}}{\mu_{\text{пр}}} \frac{\Delta P}{H}, \quad (6)$$

где $K_{\text{ч}}$ – газовая проницаемость частицы, $K_{\text{ч}} = (1 - \varphi)K_{\text{пр}} + \varphi K_{\text{г}}$; $K_{\text{пр}}$, $K_{\text{г}}$ – газовая проницаемость пирогазовой смеси и угля; $\mu_{\text{пр}}$ – динамическая вязкость пирогазов, Па·с.

Сток тепла при пиролизе древесины влияет на изменение температуры слоя. Считаем, что температуры древесной частицы и образующихся пирогазов одинаковы, а газовая и твердая фазы находятся в термодинамическом равновесии. Температура частицы при этом определяется из уравнения сохранения энергии [5]:

$$(c_{\text{г}}\rho_{\text{г}} + c_{\text{др}}\rho_{\text{др}}) \frac{\partial T_{\text{ч}}}{\partial \tau} = \frac{\partial T_{\text{ч}}}{\partial \ell} \left(\lambda_{\text{ч}} \frac{\partial T_{\text{ч}}}{\partial \ell} \right) - \rho_{\text{пр}} c_{\text{пр}} w_{\text{пр}} \frac{\partial T_{\text{ч}}}{\partial \ell} + q_{\text{хр}}, \quad (7)$$

где ℓ – текущая координата частицы, м; $\lambda_{\text{ч}}$ – коэффициент теплопроводности для частицы, Вт/(м·К); $w_{\text{пр}}$ – скорость пирогазовой смеси, м/с; $q_{\text{хр}} = q_0(-k_{\text{др}}\rho_{\text{др}})$; q_0 – удельная теплота химической реакции, Дж/кг.

Константа скорости химической реакции определяется в соответствии с законом Аррениуса:

$$k_{\text{др}} = k_{\text{др}0} \exp\left(-\frac{E_{\text{а}}}{RT}\right),$$

где $k_{\text{др}0}$ – предэкспоненциальный множитель, с⁻¹; $E_{\text{а}}$ – энергия активации, Дж/моль.

Запишем начальные условия для решения уравнений (2)–(5) и (7):

$$\rho'_{\text{др}} = \rho'_{\text{др}0}; \rho'_{\text{г}} = 0; \rho'_{\text{пр}} = 0; T_{\text{ч}} = T_{\text{н}},$$

а также граничные условия для уравнения (7):

$$T_{\text{ч}}|_{\ell=L} = T_{\text{сл}}.$$

Эффективный коэффициент теплопроводности $\lambda_{\text{эф}}$ в уравнении (1) зависит от порозности и температуры слоя:

$$\lambda_{\text{эф}} = f(\varepsilon, T_{\text{сл}}),$$

т. е. его можно определить экспериментальным путем.

Коэффициент теплопроводности для частицы в уравнении (7) найдем как сумму теплопроводностей древесины ($\lambda_{\text{др}}$), угля ($\lambda_{\text{г}}$) и летучих веществ ($\lambda_{\text{т}}$) с учетом степени пиролиза и излучения тепла через поры [3, 9]:

$$\lambda_{\text{ч}} = (1 - \varphi) \lambda_{\text{др}} + \varphi \lambda_{\text{г}} + \varepsilon \lambda_{\text{г}} + \frac{13,5c_0 T^3 d_{\text{пор}}}{\psi_{\text{г}}},$$

где c_0 – коэффициент излучения абсолютно черного тела, Вт/м²·К⁴; $d_{\text{пор}}$ – размер пор, $d_{\text{пор}} = 5 \cdot 10^{-5}(1 - \varphi) + 10^4 \varphi$; $\psi_{\text{г}}$ – степень черноты газового потока.

Таким образом, разработанная нами математическая модель процесса позволяет рассчитать его основные характеристики, а также параметры установки.

Заключение

На основе анализа физической картины процесса пиролиза в установке для производства древесного угля была разработана математическая модель тепломассопереноса, осложненного химическими превращениями, которая описывает пирогенетическое разложение древесины и может быть использована для математического моделирования и проведения расчетов при проектировании этих установок.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Пат. 2582696 Российская Федерация, МПК С 10 В 1/04. Установка для производства древесного угля / Сафин Р.Г., Тимербаев Н.Ф., Сафин Р.Р., Зиятдинова Д.Ф., Хабибуллина А.Р., Ахметова Д.А., Сафина А.В., Саттарова З.Г., Степанова Т.О. 2014.
2. Сафин Р.Г. Актуальные проблемы технологических процессов лесозаготовительных и деревоперерабатывающих производств: учеб. пособие. Казань: Изд-во КНИТУ, 2016. 408 с.
3. Сафин Р.Г., Ахметова Д.А., Сафина А.В., Зиятдинов Р.Р., Хабибуллина А.Р. Математическая модель тепломассообменных процессов, протекающих при переработке древесных отходов // Вестн. Казан. технол. ун-та. 2015. Т. 18, № 3. С. 161–163.
4. Сафин Р.Г., Зиятдинов Р.Р., Сафина А.В., Хабибуллина А.Р. Пиролизная переработка отходов лесопромышленного комплекса в древесный уголь // Вестн. Казан. технол. ун-та. 2014. Т. 17, № 20. С. 132–134.
5. Сафин Р.Г., Степанова Т.О., Хабибуллина А.Р. Математическая модель тепломассообменных процессов, протекающих при переработке древесных отходов // Актуальные направления научных исследований XXI века: теория и практика. 2015. Т. 3, № 7-2(18-2). С. 413–417.
6. Сафина А.В., Тимербаев Н.Ф., Хабибуллина А.Р., Асаева Л.Ш., Калашиникова А.С. Моделирование процесса конвективного охлаждения древесного угля в пиролизной установке // Деревообраб. пром-сть. 2017. № 1. С. 33–39.
7. Тимербаев Н.Ф., Сафин Р.Г., Хисамеева А.Р., Шулаев М.В., Хузеев М.В. Разработка энергосберегающей технологии газогенерации древесных отходов // Вестн. Казан. энергет. ун-та. 2012. № 1(12). С. 24–32.
8. Bridgwater A.V. Biomass Fast Pyrolysis // Thermal Science. 2004. Vol. 8, no. 2. Pp. 21–49. Режим доступа: www.doiserbia.nb.rs/img/doi/0354-9836/2004/0354-98360402021B.pdf (дата обращения: 17.10.18). DOI: 10.2298/TSCI0402021B
9. Di Blasi C. Heat, Momentum and Mass Transport through a Shrinking Biomass Particle Exposed to Thermal Radiation // Chemical Engineering Science. 1996. Vol. 51, iss. 7. Pp. 1121–1132. DOI: 10.1016/S0009-2509(96)80011-X
10. Sadrtidinov A.R., Safin R.G., Gerasimov M.K., Petrov V.I., Gilfanov K.K. The Mathematical Description of the Gasification Process of Woody Biomass in Installations with a Plasma Heat Source for Producing Synthesis Gas // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2016. Vol. 124. Pp. 1–8. DOI: 10.1088/1757-899X/124/1/012092
11. Safin R., Barcik Š., Tuntsev D., Safin R., Hismatov R. A Mathematical Model of Thermal Decomposition of Wood in Conditions of Fluidized Bed // Acta Facultatis Xylologiae Zvolen. 2016. Vol. 58(2). Pp. 141–148. DOI: 10.17423/afx.2016.58.2.15
12. 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. 2014. Vol. 9, no. 5. Pp. 141–146.

13. Tuntsev D.V., Safin R.G., Hismatov R.G., Halitov R.A., Petrov V.I. The Mathematical Model of Fast Pyrolysis of Wood Waste // 2015 International Conference on Mechanical Engineering, Automation and Control Systems (MEACS 2015), Tomsk, December 1–4, 2015. Tomsk, 2015. Pp. 1–4. DOI: 10.1109/MEACS.7414929

Поступила 17.10.18

UDC 66.092–977

DOI: 10.17238/issn0536-1036.2019.1.153

Heat and Mass Transfer Simulation in the Pyrolysis Zone

A.V. Safina, Candidate of Engineering Sciences, Associate Professor

N.F. Timerbaev, Doctor of Engineering Sciences, Professor

D.F. Ziatdinova, Doctor of Engineering Sciences, Professor

R.G. Safin, Doctor of Engineering Sciences, Professor

A.R. Khabibullina, Assistant

Kazan National Research Technological University, ul. K. Marksа, 68, Kazan, 420015, Russian Federation; e-mail: cfaby@mail.ru, cpekgeu@gmail.com, ziatdinova2804@gmail.com, safin@kstu.ru, almira-h@rambler.ru

Nowadays, about 200 mln m³ of timber is harvested in our country. At all stages of the process (from harvesting to raw wood processing) a large amount of waste that does not find any usage and has negative influence on the environment is generated at the same time. Pyrolysis is one of the feasible directions of such waste processing. The yield of pyrolysis products depends on the external conditions and the raw materials properties. The article describes a plant targeting for production of activated carbon from wood chips. The plant is designed as a mine. It has a pyrolysis zone operating in periodic mode. Heating elements are located in the lower part of the pyrolysis zone. They heat industrial chips prior to intense exothermic reactions. Thermal energy is transferred to the heating elements by a heat pipe placed in charcoal after the activation stage, which has temperature about 800 °C. Valuable products are obtained from wood waste with the use of this plant, which are in a great demand in the industry. The environmental problem of many wood processing enterprises is being solved; disposal of waste dumps. Mathematical model of the process has been developed based on the analysis of the physical phenomenon and pyrolysis process formalization in the activated carbon plant. The model allows calculating the total time spent on wood waste processing and the main design parameters of the plant.

Keywords: mathematical model, heat and mass transfer, charcoal, pyrolysis, activation, gas flow.

REFERENCES

1. Safin R.G., Timerbaev N.F., Safin R.R., Ziatdinova D.F., Khabibullina A.R., Akhmetova D.A., Safina A.V., Sattarova Z.G., Stepanova T.O. *Ustanovka dlya proizvodstva drevesnogo uglya* [Charcoal Plant]. Patent RF, no. 2582696. 2014.

2. Safin R.G. *Aktual'nyye problemy tekhnologicheskikh protsessov lesozagotovitel'nykh i derevopererabatyvayushchikh proizvodstv*: ucheb. posobiye [Topical Issues of Wood Processing and Woodworking Technologies]: учеб. пособие [Topical Issues of Wood Processing and Woodworking Technologies]. Kazan: Kazan National Research Technological University, 2018. Pp. 1–100.

For citation: Safina A.V., Timerbaev N.F., Ziatdinova D.F., Safin R.G., Khabibullina A.R. Heat and Mass Transfer Simulation in the Pyrolysis Zone. *Lesnoy Zhurnal* [Forestry Journal], 2019, no. 1, pp. 153–160. DOI: 10.17238/issn0536-1036.2019.1.153

sues of technological Processes of Logging and Wood Conversion Industries: Educational Textbook]. Kazan, KSTU Publ., 2016. 408 p. (In Russ.)

3. Safin R.G., Akhmetova D.A., Safina A.V., Ziatdinov R.R., Khabibullina A.R. Matematicheskaya model' teplomassoobmennykh protsessov, protekayushchikh pri pererabotke drevesnykh otkhodov [Mathematical Model of Heat and Mass Transfer Processes Occurring in Wood Waste Processing]. *Vestnik Kazanskogo tekhnologicheskogo universiteta*, 2015, vol. 18, no. 3, pp. 161–163.

4. Safin R.G., Ziatdinov R.R., Safina A.V., Khabibullina A.R. Piroliznaya pererabotka otkhodov lesopromyshlennogo kompleksa v drevesnyy ugol' [Pyrolysis of Forest Sector Waste to Charcoal]. *Vestnik Kazanskogo tekhnologicheskogo universiteta*, 2014, vol. 17, no. 20, pp. 132–134.

5. Safin R.G., Stepanova T.O., Khabibullina A.R. Matematicheskaya model' teplomassoobmennykh protsessov, protekayushchikh pri pererabotke drevesnykh otkhodov [Mathematical Model of Heat and Mass Transfer Processes Occurring in Wood Waste Processing]. *Aktual'nyye napravleniya nauchnykh issledovaniy XXI veka: teoriya i praktika* [Topical Areas of Research of the 21st Century: Theory and Practice]. 2015, vol. 3, no. 7-2(18-2), pp. 413–417.

6. Safina A.V., Timerbaev N.F., Khabibullina A.R., Asayeva L.Sh., Kalashnikova A.S. Modelirovaniye protsessa konvektivnogo okhlazhdeniya drevesnogo uglya v piroliznoy ustanovke [Modeling of Charcoal Convective Cooling in Pyrolysis Plant]. *Derevoobrabatativaushaya promishlennost'* [Woodworking Industry], 2017, no. 1, pp. 33–39.

7. Timerbaev N.F., Safin R.G., Khisameyeva A.R., Shulayev M.V., Khuzeev M.V. Razrabotka energosberegayushchey tekhnologii gazogeneratsii drevesnykh otkhodov [Development of Energy-Saving Technology of Wood Waste Gas Generation]. *Vestnik Kazanskogo gosudarstvennogo energeticheskogo universiteta*, 2012, no. 1(12), pp. 24–32.

8. Bridgwater A.V. Biomass Fast Pyrolysis. *Thermal Science*, 2004, vol. 8, no. 2, pp. 21–49. Available at: www.doiserbia.nb.rs/img/doi/0354-9836/2004/0354-98360402021B.pdf (accessed 17.10.18). DOI: 10.2298/TSCI0402021B

9. Di Blasi C. Heat, Momentum and Mass Transport through a Shrinking Biomass Particle Exposed to Thermal Radiation. *Chemical Engineering Science*, 1996, vol. 51, iss. 7, pp. 1121–1132. DOI: 10.1016/S0009-2509(96)80011-X

10. Sadrtidinov A.R., Safin R.G., Gerasimov M.K., Petrov V.I., Gilfanov K.K. The Mathematical Description of the Gasification Process of Woody Biomass in Installations with a Plasma Heat Source for Producing Synthesis Gas. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2016, vol. 124, pp. 1–8. DOI: 10.1088/1757-899X/124/1/012092

11. Safin R., Barcik Š., Tuntsev D., Safin R., Hismatov R. A Mathematical Model of Thermal Decomposition of Wood in Conditions of Fluidized Bed. *Acta Facultatis Xylogicae Zvolen*, 2016, vol. 58(2), pp. 141–148. DOI: 10.17423/afx.2016.58.2.15

12. 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*, 2014, vol. 9, no. 5, pp. 141–146.

13. Tuntsev D.V., Safin R.G., Hismatov R.G., Halitov R.A., Petrov V.I. The Mathematical Model of Fast Pyrolysis of Wood Waste. *2015 International Conference on Mechanical Engineering, Automation and Control Systems (MEACS 2015). Tomsk, December 1–4, 2015*. Tomsk, 2015, pp. 1–4. DOI: 10.1109/MEACS.7414929

Received on October 17, 2018