



## КОНВЕКТИВНАЯ СУШКА ДИСПЕРСНЫХ МАТЕРИАЛОВ ПЕРЕД ТЕРМОХИМИЧЕСКИМ ПРОЦЕССОМ ПЕРЕРАБОТКИ

Н.Ф. Тимербаев<sup>1</sup>, Р.Г. Сафин<sup>2</sup>, Д.Ф. Зиятдинова<sup>2</sup>, Т.О. Степанова<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Казанский государственный энергетический университет, г. Казань, Россия

<sup>2</sup>Казанский национальный исследовательский технологический университет,

г. Казань, Россия

*сpekgeu@gmail.com*

**Резюме:** Сушка древесных материалов – один из самых важных процессов не только деревопереработки, но и многих других отраслей промышленности. Процессы сушки подразумевают удаление влаги в результате фазового перехода из жидкого или твердого состояния в газообразное. Это связано с большой энергоемкостью и длительностью процесса, особенно для материалов коллоидного типа. Последнее обусловлено тем, что при интенсивной сушке часто уменьшается качество готового продукта, например, при сушке пиломатериалов происходит их растрескивание и коробление, что недопустимо при производстве термомодифицированных изделий. В случаях термохимической переработки дисперсных материалов качество сырья определяется только конечным влагосодержанием дисперсных материалов. В работе рассмотрена конвективная сушка дисперсных материалов перед термохимическим процессом переработки. Представлена зона конвективной сушки дисперсных материалов. Проведено экспериментальное и математическое моделирование процесса сушки влажных дисперсных материалов перед термохимической переработкой. Представлены результаты теоретических и экспериментальных исследований изменения температуры и влажности дисперсных материалов в сушильном бункере. Определены характер изменения температуры и влажности дисперсных частиц в сушильном бункере. Расчетным путем установлена эффективная высота слоя в противоточной сушилке в зависимости от влажности топлива и температуры отработанных топочных газов.

**Ключевые слова:** конвективная сушка; термомодификация; газогенерация; пиролиз; дисперсный материал; активированный уголь; тепломассоперенос; топочные газы; влагосодержание; сырье.

**Для цитирования:** Тимербаев Н.Ф., Сафин Р.Г., Зиятдинова Д.Ф., Степанова Т.О. Конвективная сушка дисперсных материалов перед термохимическим процессом переработки // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2019. Т.21. С.29-37. doi:10.30724/1998-9903-2019-21-5-29-37.

## CONVECTIV DRYING OF DISPERSED MATERIALS BEFORE THE THERMOCHEMICAL PROCESSING

NF Timerbaev<sup>1</sup>, RG Safin<sup>2</sup>, DF Ziatdinova<sup>2</sup>, TO Stepanova<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia

<sup>2</sup>Kazan National Research Technological University, Kazan, Russia

*сpekgeu@gmail.com*

**Abstract:** Drying of wood materials is one of the most important processes not only of wood processing, but also of many other industries. Drying processes involve the removal of moisture as a result of a phase transition from a liquid or solid to a gaseous state. This is due to the high energy intensity and duration of the process, especially for colloidal materials. The latter is due to the fact that with intensive drying the quality of the finished product often decreases, for example, when drying lumber cracks and warps occur, which is unacceptable

*in the manufacture of thermally modified products. In cases of thermochemical processing of dispersed materials, the quality of raw materials is determined only by the final moisture content of dispersed materials. Questions of heat and mass transfer during the drying of materials were carried out by Girsh M., Lykov A.V., Lurye M.V., Sazhin B.S., Dolinsky A.A., Golubev L.G., Rudobashita S.P., Shubin G.S., Romankov PG, Ginzburg A.S., Mikhailov N.V., Mushtayev VI. and etc. The paper deals with convective technology of dispersive materials. The zone of convective drying of dispersed materials is presented. Experimental and mathematical modeling of the drying process of wet dispersed materials before thermochemical processing was carried out. The results of theoretical and experimental studies of changes in temperature and humidity in the drying bin are presented. The nature of changes in temperature and humidity of dispersed particles in a drying bin was determined. The effective height of the layer in the counter-current dryer is determined by calculation, depending on the moisture content of the fuel and the temperature of the exhaust flue gases.*

**Keywords:** convective drying; thermal modification; gas generation; pyrolysis; dispersed material; activated carbon; heat and mass transfer; flue gases; moisture content; raw material

**For citation:** Timerbaev NF, Safin RG, Ziatdinova DF, Stepanova TO. Convective drying of dispersed materials before the thermochemical processing. *Power engineering: research, equipment, technology*. 2019; 21 (5):29-37. (In Russ). doi:10.30724/1998-9903-2019-21-5-29-37.

### **Введение**

Начальной стадией термохимических процессов переработки органических дисперсных материалов [1]: термомодификации, газогенерации, пиролиза, производства активированного угля является сушка. Сушка древесных материалов связана с высокой энергоемкостью и длительностью процесса [2]. Последнее обусловлено тем, что при интенсивной сушке часто уменьшается качество готового продукта, например, при сушке пиломатериалов происходит их растрескивание и коробление, что недопустимо при производстве термомодифицированных изделий. В случаях термохимической переработки дисперсных материалов качество сырья определяется только конечным влагосодержанием дисперсных материалов. Поэтому возможно применение высокотемпературных режимов сушки [3,4]. В зависимости от конечной задачи процессов и поставленных целей применяют различные виды сушки: конвективную [5], кондуктивную, вакуумную [6]. Наиболее применяемым способом удаления влаги из органического материала остается конвективная сушка. В связи с выделением в процессе термохимической переработки горючих газов, которые сжигаются для поддержания экзотермических процессов, в качестве теплоносителя применяют топочные газы.

### **Материалы и методы**

В непрерывно-действующей установке производства активированного угля [7] предлагается организовать конвективный процесс сушки дисперсных материалов топочными газами при противоточном режиме. Схема зоны конвективной сушки дисперсных материалов представлена на рис. 1. Процесс начинается с того, что предварительно измельченные дисперсные материалы с начальной температурой  $T_{m0}$  и влагосодержанием  $U_0$  через барабанный питатель непрерывно направляют в зону конвективной сушки, где органические отходы подвергают прогреву топочными газами при температуре  $250^{\circ}\text{C}$  и под действием собственного веса двигаются вниз со скоростью  $w_m$ .

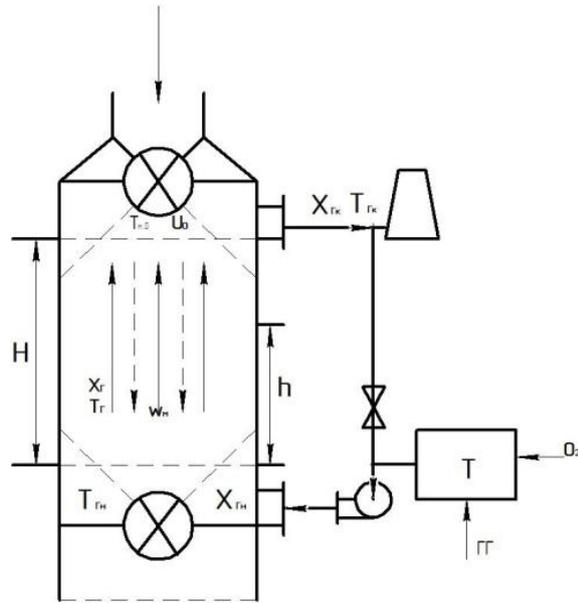


Рис. 1. Зона конвективной сушки дисперсных материалов

Габаритные размеры сушильной зоны (сечение –  $S$ , высота слоя –  $H$ ) определяются:  
 – заданной производительностью по высушиваемому продукту –  $B$ ;  
 – начальным влагосодержанием исходного сырья –  $U_0$ ;  
 – параметрами сушильного агента – топочного газа: начальной температурой  $T_{Г0}$  и начальным влагосодержанием  $X_{Г0}$ ;  
 – процессами тепломассопереноса, протекающими в дисперсном материале [8].

Производительность сушильной зоны определяется заданной массовой производительностью установки термохимической переработки дисперсных материалов –  $B$  и начальным влагосодержанием материала –  $U_0$ :

$$B_0 = B(1 + U_0) \quad (1)$$

Масса высушиваемого материала в сушильной зоне рассчитывается по соотношению:

$$m_n = B_0 \cdot \tau_c, \quad (2)$$

где:  $\tau_c$  – время сушки определяется решением уравнений тепломассопереноса[9].

Рабочий объем сушильной зоны рассчитывается с учетом порозности насыпного слоя  $\epsilon_{сл}$  по соотношению:

$$V_0 = \frac{m_n \cdot \rho_{др}}{1 - \epsilon_{сл}} = H \cdot S, \quad (3)$$

где:  $H$  – высота слоя высушиваемого материала в сушильной зоне;  $S$  – сечение сушильной камеры.

Порозность слоя определяется обработкой экспериментальных данных  $V_{Г}^3$ ,  $V_0^3$

$$\epsilon_{сл} = \frac{V_0 - V_m}{V_0} = \frac{V_{Г}^3}{V_0^3}, \quad (4)$$

где:  $V_0^3$  – объем насыпного слоя в эксперименте;  $V_{Г}^3$  – объем воздуха в насыпном слое.

Скорость движения высушиваемых частиц в сушильной зоне:

$$w_m = \frac{H}{\tau_c}. \quad (5)$$

Поток влаги из материала определяется градиентами влагосодержания  $U$ , температуры  $T$  и давления  $P$ :

$$j = -K\rho_o \frac{\partial U}{\partial x} - K_T \rho_o \frac{\partial U}{\partial x} - K_p \frac{\partial P}{\partial x} \quad (6)$$

Применительно к плоским частицам толщиной равной  $2b$  внутреннюю задачу процесса можно описать системой дифференциальных уравнений Лыкова записанных для бесконечной пластины:

$$\frac{\partial U}{\partial h} = a_m \frac{1}{w_m} \left( \frac{\partial^2 U}{\partial x^2} \right) + a_m \delta \frac{1}{w_m} \left( \frac{\partial^2 T_M}{\partial x^2} \right) + \frac{k_p}{\rho_0} \frac{1}{w_m} \left( \frac{\partial^2 p_M}{\partial x^2} \right), \quad (7)$$

$$\frac{\partial T_M}{\partial h} = a_T \frac{1}{w_m} \left( \frac{\partial^2 T_M}{\partial x^2} \right) + \frac{r\varepsilon}{c_M} \left( \frac{\partial U}{\partial h} \right) \quad (8)$$

$$\frac{\partial p_M}{\partial h} = \frac{RT_M}{C_0 \mu} \left[ \kappa_p \frac{1}{w_m} \frac{\partial^2 p_M}{\partial x^2} + \varepsilon \cdot \rho_0 \frac{\partial U}{\partial h} \right] + \frac{p_M}{T_M} \left( \frac{\partial T_M}{\partial h} \right) \quad (9)$$

где:  $a_m$ ,  $a_T$ ,  $k_p$ ,  $\delta$  – коэффициенты, соответственно, влагопроводности, температуропроводности, фильтрационного переноса пара; относительной термодиффузии [10].

Начальные условия представленных дифференциальных уравнений имеют вид:

$$U(0; x) = U_0; \quad (10)$$

$$T_M(0; x) = T_{M,0}; \quad (11)$$

$$p_M(0; x) = p_{атм}. \quad (12)$$

Влагосодержание на поверхности частиц  $U(h, b)$  считаем равным равновесному влагосодержанию, определяемому из уравнения Фрейндлиха:

$$U(h, b) = Up = a_\phi \cdot \phi^n \quad (13)$$

где:  $a_\phi$  и  $\phi^n$  – константы, зависящие от свойств органического материала.

Для оценки температуры частиц на поверхности  $T_M(h, b)$  принимаем граничное условие 3-го рода:

$$\left. \frac{\partial T_M}{\partial x} \right|_{x=b} = \alpha [T_\Gamma - T_M(h, b)] \quad (14)$$

Уравнение фильтрационного переноса (9) необходимо учитывать при температуре в материале более  $100^\circ\text{C}$ . Считаем, что давление на поверхности частиц определяется напором, создаваемым газодувкой топочных газов  $H_\Gamma$  и потерей давления в насыпном слое высушиваемого материала:

$$P(h, b) = P_{атм} + H_\Gamma - \rho(1 - \varepsilon_{сн})h \quad (15)$$

Коэффициент теплоотдачи находится из критериального уравнения для случая ламинарного обтекания слоя дисперсного материала [11,12].

Изменение параметров топочного газа – влагосодержания  $X_\Gamma$  и температуры  $T_\Gamma$ , при прохождении через слой высушиваемых древесных частиц при расходе  $L_0$  оценивается через уравнения материального и теплового балансов:

$$\frac{dX_\Gamma}{dh} = - \frac{j \cdot f}{\rho_0 (1 - \varepsilon_{сн}) w_\Gamma} \frac{B_0}{L_0} \quad (16)$$

$$\frac{dT_\Gamma}{dh} = \frac{q}{c_\Gamma \rho_\Gamma \varepsilon_{сн} \cdot w_\Gamma} \frac{f}{L_0} \quad (17)$$

Влагосодержание топочного газа на входе в сушильную зону определяется объемом паров воды, образовавшихся при сжигании сепарированных пиролизных газов:

$$X_{ГН} = \frac{V_{H_2O} \cdot \rho_{П}}{V_{с.г} \cdot \rho_{с.г}} \quad (18)$$

Влагосодержание топочных газов при прохождении через слой высушиваемых частиц возрастает и на выходе из сушильной зоны определяется соотношением:

$$X_{ГК} = \frac{B_0 (U_{мн} - U_{мк}) + L_0 X_{ГН}}{L_0} \quad (19)$$

Влажность топочного газа  $\varphi$  зависит от его влагосодержания и давления насыщения:

$$\varphi = \frac{P \cdot X_{к} \cdot M_{с.г}}{p_{н} (M_{в} + M_{с.г} \cdot X_{к})} \quad (20)$$

Давление насыщения, в соответствии с законом Антуана, определяется температурой топочного газа  $T_{Г}$

$$p_{н} = \exp\left(18,92 - \frac{5298,31}{(T_{Г} + 273,15)}\right) - \exp\left(15,94 - \frac{9648,57}{(T_{Г} + 273,15)^{1,5}}\right) \quad (21)$$

Пористость древесных частиц рассчитывают, используя соотношение:

$$C_0 = 1 - \rho_6 \cdot \left(\frac{1}{\rho_{д.в}} + \frac{W}{100 \cdot \rho_{ж}}\right) \quad (22)$$

Коэффициент теплопроводности дисперсных материалов зависит от вида высушиваемого материала, температуры и влагосодержания. Для древесных частиц определяется соотношением:

$$\lambda_{м} = \sqrt{0,0108 + 0,000773T^{0,349} + 1,083 \cdot 10^{-4} \exp\left[\frac{T}{111,61}\right] \cdot U \cdot 100 \cdot \ln(T \cdot 100)} \quad (23)$$

Теплоемкость древесной частицы  $c_{м}$  в зависимости от влажности и температуры находим с помощью эмпирического уравнения:

$$c_{м} = 1173 \cdot \left(U \cdot 100 \cdot \left[1 + \frac{T}{100}\right]\right)^{-0,222 - U \cdot 10^{-2}} \quad (24)$$

Для расчета коэффициента массопроводности древесных материалов используется эмпирическое соотношение:

$$a_{м} = 0,047 \rho_0^{-3,235} \cdot \exp(0,03T) \quad (25)$$

Теплоту парообразования в зависимости от температуры и влагосодержания древесины можно определить из выражения:

$$r = r_{в} + q_{дес} \quad (26)$$

где:

$$r_{в} = \sqrt{\frac{6174435,2 - 16323,189 \cdot T_{м}}{1 - 0,0011284533 \cdot T_{м}}} \cdot 10^3 \quad (27)$$

Значение относительного коэффициента термодиффузии  $\delta$  в уравнении (7) рассчитывается по соотношению:

$$\delta = C'm \left[ \left(\frac{\partial \mu}{\partial T}\right)_c + S \right] \quad (28)$$

где:  $C'm = \left(\frac{\partial U}{\partial \mu}\right)_T$  – удельная изотермическая теплоемкость;  $\left(\frac{\partial \mu}{\partial T}\right)_C$  – температурный коэффициент химического потенциала;  $S$  – коэффициент Сорэ.

Удельная поверхность частиц  $f$  находится по известному выражению:

$$f = \frac{F_M}{V_H} \quad (29)$$

где:  $F_M$  – суммарная поверхность частиц, находящихся в насыпном объеме частиц  $V_H$ .

Система уравнений (7÷9) при крайних условиях (10÷15) описывает процесс теплообмена в сушильной зоне с противоточным режимом движения фаз (13÷15).

### Результаты и обсуждение

При конвективной сушке дисперсных материалов топочными газами, образующимися при сгорании горючих газов, выделяющихся при термохимической переработке, интенсивность удаления будет зависеть от параметров топочного газа: температуры, удельного объема топочных газов и его влагосодержания.

В результате анализа были выявлены зависимости изменения коэффициентов теплопроводности и массопроводности внутри древесных материалов в зависимости от температуры и влажности материала, представленные на рис. 2 и 3.

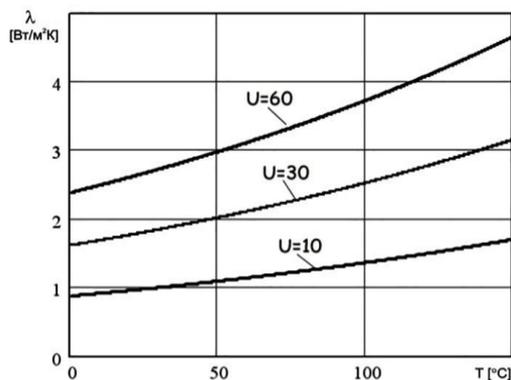


Рис. 2. Зависимость коэффициента теплопроводности сосны от температуры при различном влагосодержании материала

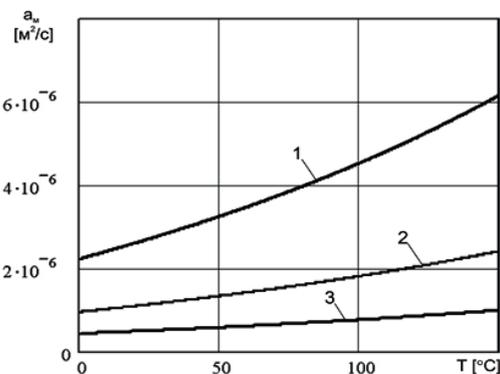


Рис. 3. Зависимость коэффициента массопроводности сосны от температуры при различном влагосодержании: 1 – U=60%; 2 – U=30%; 3 – U=10%

Анализ (рис. 4) расчетных и экспериментальных зависимостей равновесного влагосодержания дисперсных частиц сосны от относительной влажности топочного газа, построенных при различных температурах теплоносителя показывает достаточную сходимость данных. Предельные отклонения расчетных и экспериментальных данных не превышает 18 %.

Анализ расчетных зависимостей влагосодержания древесной пластины по сечению (рис. 5) показывает, что дисперсные материалы при скорости  $w_M = 1$  м / час высыхают, практически, в верхней половине сушильной зоны. Эффективная высота насыпного слоя высушиваемого материала может быть равной 0,5 м. В нижней половине сушильной зоны начинается термомодификация древесных частиц, способствующая ускорению последующих процессов термохимической переработки дисперсных материалов.

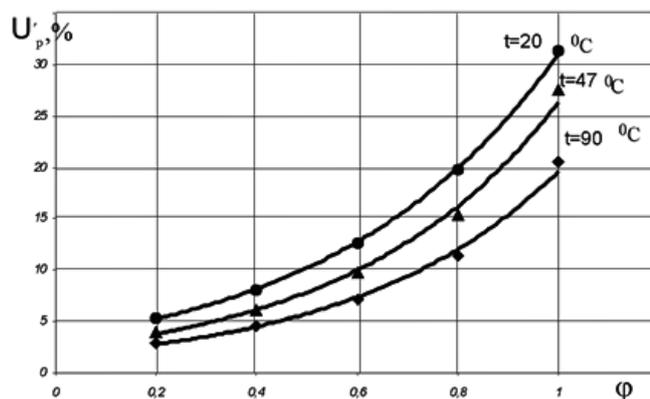


Рис. 4. Зависимость равновесного влагосодержания дисперсных частиц от относительной влажности  $\phi$  топочного газа

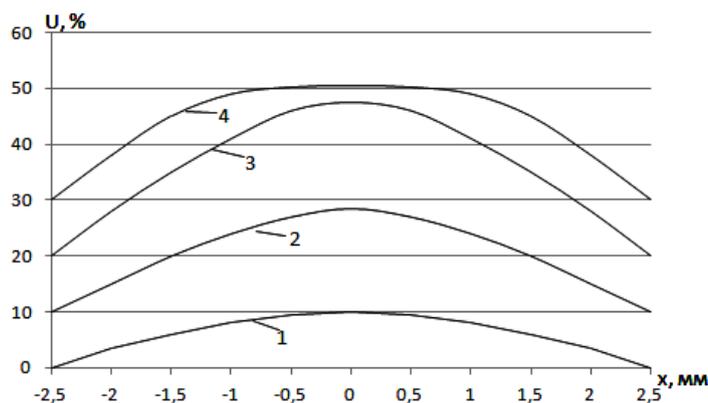


Рис. 5. Распределение влагосодержания по сечению частицы в различных сечениях слоя ( $T_r=250\text{ }^\circ\text{C}$ ,  $U_n=50\%$ ,  $b=2,5$ ): 1 –  $h=0,5$ ; 2 –  $h=0,7$ ; 3 –  $h=0,8$ ; 4 –  $h=0,9$

На рис. 6 приведено распределение среднего влагосодержания и температуры древесных частиц, температуры топочного газа по высоте насыпного слоя высушиваемого материала.

Анализ кривых показывает, что топочные газы на выходе из сушильной зоны имеют небольшой потенциал сушки, вследствие насыщенности парами воды, отбираемой из высушиваемого материала.

При организации рециркулирующего режима сушки следует топочные газы направлять на кондуктивный прогрев входящего сырья за счет конденсации паров воды из топочного газа. Это позволит регулировать температуру входящего теплоносителя путем смешения с охлажденными топочными газами, имеющими меньшее влагосодержание [12].

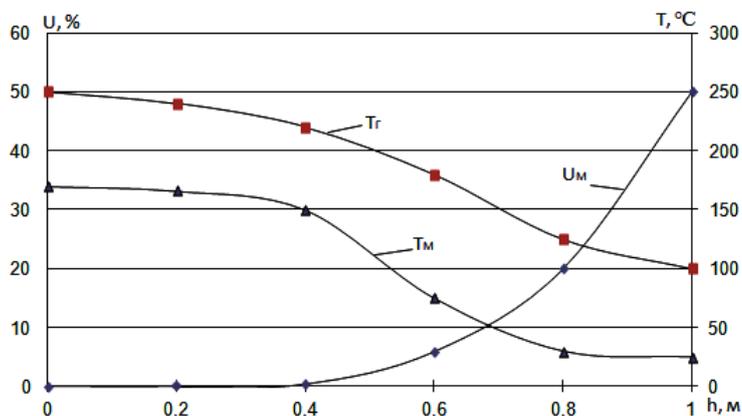


Рис. 6. Распределение средних влагосодержания материала, температуры топочного газа и температуры материала по высоте слоя ( $T_r=250\text{ }^\circ\text{C}$ ,  $U_n=50\%$ )

### Заключение

Проведено экспериментальное и математическое моделирование процесса сушки влажных дисперсных частиц перед термохимической переработкой, на примере древесных частиц.

В результате математического моделирования определены характер изменения температуры и влажности дисперсных частиц в сушильном бункере, расчетным путем установлена эффективная высота слоя в противоточной сушилке в зависимости от влажности топлива и температуры отработанных топочных газов.

### Литература

1. Тимербаева А.Л. Обзор технических решений для осуществления процесса термической обработки измельченной древесины // *Деревообрабатывающая промышленность*. 2017. № 1. С. 57-63.
2. Сафин Р.Г. Пат 2582696 РФ, МПК С 10 В 1/04. Установка для производства древесного угля; заявл. 29. 12. 2014. опубл. 27. 04. 2016.
3. Mettler M.S. Top ten fundamental challenges of biomass pyrolysis for biofuels // *Energy Environ Sci* 2012. 2012(5). pp. 797-809.
4. Таймаров М.А., Тимербаев Н.Ф., Хуснуллин И.И., Шулаев М.В. Энергосберегающая установка термохимического разложения отходов деревообрабатывающих предприятий // *Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики*. 2012. №3-4. С. 88-93.
5. Сафина А.В. Математическое моделирование процесса контактного теплопереноса для пирогенетических установок полунепрерывного действия // *Вестник Казанского технологического университета*. 2017. Т.20. №7. С. 119-122.
6. Тунцев Д.В. Переработка отработанных деревянных шпал термическим методом // *Деревообрабатывающая промышленность*. 2018 г. № 3. С. 61-66.
7. Antal M.J. Biomass pyrolysis: a review of the literature. Part I. Carbohydrate pyrolysis // *Adv. InsolatEnergy*. 1983. pp.61 - 111.
8. Тимербаев Н.Ф. Технология и оборудования для электроэнергетического использования древесных отходов // *Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики*. 2017. Т. 19. № 1-2. С. 102-107.
9. Тимербаев Н.Ф. Современное состояние производства древесного угля // *Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики*. 2017. Т. 19. № 1-2. С. 102-107.
10. Sadrtidinov A.R., Sattarova Z.G., Prosvirnikov D.B., Tuntsev D.V. 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. P. 7414914.
11. Tuntsev D.V. The mathematical model of fast pyrolysis of wood // *In 2015 Int. Conf. on Mechanical Engineering, Automation and Control Systems (MEACS)* pp. 1-4.
12. Сафин Р.Г. Математическая модель теплообменных процессов, протекающих при переработке древесных отходов // *Вестник Казанского технологического университета*. 2015. Т.18, №3. С.161-163.
13. Костылева Е.Е. Термическая сушка, как способ повышения эффективности процесса сжигания илового осадка // *Вестник Казанского государственного энергетического университета*. 2018. Т.10. №2. С. 73-80.
14. Гатина Р.З. Перспективы развития малой энергетики с использованием топливных элементов // *Вестник Казанского государственного энергетического университета*. 2018. Т.10. №1. С. 88-96.
15. Хабибуллина А.Р. Конвективная сушка древесных отходов перед стадией пиролиза // *Сборник научных статей Первых Международных Лыковских научных чтений, посвящённых 105-летию академика А.В. Лыкова «Актуальные проблемы сушки и термовлажностной обработки материалов в различных отраслях промышленности и агропромышленном комплексе»*. Москва, 2015. С. 328-330.

### Авторы публикации

**Тимербаев Наиль Фаритович** – д-р.тех.наук, профессор, зав. кафедрой возобновляемых источников энергии, Казанский государственный энергетический университет.

**Сафин Рушан Гареевич** – д-р.тех.наук, профессор, зав. кафедрой переработки древесных материалов, Казанский национальный исследовательский технологический университет. Email: safin@kstu.ru.

**Зиятдинова Диляра Фарировна** – д-р.тех.наук, профессор кафедры переработки древесных материалов, Казанский национальный исследовательский технологический университет. Email: ziatdinova2804@gmail.com.

**Степанова Татьяна Олеговна** – аспирант, Казанский национальный исследовательский технологический университет. Email: stepanova-211190@yandex.ru.

### References

1. Timerbaeva AL. Review of technical solutions for the implementation of the process of heat treatment of shredded wood. *Wood Industry*. 2017;1:57-63.
2. Safin RG. Installation for the production of charcoal Pat 2582696 of the Russian Federation, IPC C 10 B 1/04. / .declare 29. 12. 2014. publ. 27.04.2016.
3. Mettler MS. Top ten fundamental challenges of biomass pyrolysis for biofuels. *Energy Environ Science*. 2012(5): 797-809.
4. Taymarov MA, Timerbaev NF., Khusnullin II., Shulaev MV. Energy-saving installation for thermochemical decomposition of waste woodworking enterprises. *Proceedings of the higher educational institutions. Energy sector problems*. 2012;3-4:88-93.
5. Timerbaev NF. Modeling the process of direct-flow gasification of wood waste. *Bulletin of Kazan University of Technology*. 2011. № 7.
6. Tuntsev DV. Processing of wooden sleepers by thermal method. *Wood industry*. 2018;3:61-66.
7. Antal MJ. Biomass pyrolysis: a review of the literature. Pt I. Carbohydrate pyrolysis. *Advance. In solar Energy*. 1983. pp.61-111.
8. Timerbaev NF. Technology and equipment for the electric power use of wood waste. *Proceedings of the higher educational institutions. Energy sector problems*. 2017;19(1-2):102-107.
9. Timerbaev NF. The current state of charcoal production. *Proceedings of the higher educational institutions. Energy sector problems*. 2017;19(1-20):102-107.
10. Sadrtidinov AR., Sattarova ZG., Prosvirnikov DB., Tuntsev DV. Modeling of thermal treatment of wood waste in the gasifiers. *Proceedings of 2015 International Conference on Mechanical Engineering, Automation and Control Systems, MEACS 2015*. pp. 741- 914.
11. Tuntsev DV. The mathematical model of fast pyrolysis of wood was. *In 2015 Int. Conf. on Mechanical Engineering, Automation and Control Systems (MEACS)*. pp 1-4. doi: 10.1109/MEACS.7414929, 2015.
12. Safin RG. Mathematical model of heat and mass transfer processes occurring during the processing of wood waste. *Bulletin of Kazan Technological University*. 2015;18(3):161-163.
13. Kostyleva EE. Thermal drying, a way to increase the efficiency of sludge combustion. *Bulletin of Kazan State Energy University*. 2018;10(2): 73-80.
14. Gatina, RZ. Prospect for the development of small energy using fuel cells. *Bulletin of Kazan State Energy University*. 2018;10(1): 88-96.
15. Khabibullina AR. Convective drying of wood waste before the pyrolysis stage. *Collection of scientific articles of the First International Lykov scientific readings dedicated to the 105th anniversary of Academician A.V. Lykov "Actual problems of drying and heat and moisture treatment of materials in various industries and agriculture"*. Moscow, 2015. pp. 328-330.

### Authors of the publication

**Nail F. Timerbaev** – Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia.

**Rushan G. Safin** – Kazan National Research Technological University, Kazan, Russia.

**Dilyara F. Ziatdinova** – Kazan National Research Technological University, Kazan, Russia.

**Tatyana O. Stepanova** – Kazan National Research Technological University, Kazan, Russia.