

DOI: 10.58168/TBiEc2025_205-210

УДК 67.05: 66.040.287

**РАСЧЕТ ТЕМПЕРАТУРНОГО ПОЛЯ И ПОЛЯ ВЛАГОСОДЕРЖАНИЯ
В ЧАСТИЦЕ В ПРОЦЕССЕ СУШКИ**

**CALCULATION OF THE TEMPERATURE FIELD AND THE FIELD OF MOISTURE
CONTENT IN A PARTICLE DURING THE DRYING PROCESS**

Манурин А.В. магистр ФГБОУ ВО «Казанский национальный исследовательский университет», Казань, Россия. **Manurin A.V.** master, Kazan National Research Technological University, Kazan, Russia.

Аннотация: проведено численное моделирование конвективной сушки сосновой щепы с решением системы уравнений тепломассопереноса для бесконечной пластины. Установлено влияние влажности на температуропроводность материала и динамику прогрева. Результаты показали, что сушка до 12% влажности оптимальна, так как дальнейшее обезвоживание требует значительных энергозатрат. Определено, что размер частиц 5–10 мм обеспечивает эффективную сушку при температуре 300–350 °С. Полученные данные позволяют оптимизировать параметры сушильных установок для пиролиза древесных отходов.

Abstract: numerical modeling of convective drying of pine chips was performed with the solution of the system of heat and mass transfer equations for an infinite plate. The influence of humidity on the thermal diffusivity of the material and the dynamics of heating was established. The results showed that drying up to 12% humidity is optimal, since further dehydration requires significant energy costs. It was determined that the particle size of 5–10 mm ensures effective drying at a temperature of 300–350 °C. The obtained data allow optimizing the parameters of drying units for the pyrolysis of wood waste.

Ключевые слова: пиролиз, сельскохозяйственные отходы, термическое разложение, биотопливо, синтез-газ.

Keywords: pyrolysis, agricultural waste, thermal decomposition, biofuel, synthesis gas.

Для выявления оптимальных технологических параметров процесса конвективной сушки было проведено численное моделирование изменения влагосодержания и температуры древесной частицы посредством решения системы дифференциальных уравнений тепломассопереноса, записанных для бесконечной пластины. Получены динамические кривые температуры и влажности материала, которые позволяют рекомендовать технологические параметры для установки.

Математическое моделирование процесса конвективной сушки сыпучего вторичного сырья предполагает нахождение нестационарного поля влажности сырья по сечению материала на основе решения системы дифференциальных уравнений тепломассопереноса, записанных для бесконечной пластины:

$$\frac{\partial T}{\partial \tau} = a_T \frac{\partial^2 T}{\partial x^2}$$

$$\frac{\partial U}{\partial \tau} = K \frac{\partial^2 U}{\partial x^2} + K\delta \frac{\partial^2 T}{\partial x^2}$$

где: T - температура высушиваемого материала, °C;

U - влажность высушиваемого материала;

a_T – коэффициент температуропроводности, м/с²;

K – коэффициент влагопроводности, м²/с;

δ – термоградиентный коэффициент, кг/(кг * К) [1].

Начальные условия уравнения системы дифференциальных уравнений тепломассопереноса, задаются исходными значениями влажности U_{m0} и температуры высушиваемого материала T_{m0} :

$$U(x; 0) = U_{m0}; T(x; 0) = T_{m0};$$

условия на границе высушиваемой частицы:

$$-\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{x=0} = \alpha dT$$

$$-K \frac{\partial U}{\partial x} \Big|_{x=0} = \beta dU$$

где: λ – теплопроводность, Вт/м² * °C;

α – коэффициент теплоотдачи, Вт/м² * °C;

β – коэффициент массоотдачи, кг/м² * с.

Схема краевых условий для решения системы дифференциальных уравнений тепломассопереноса представлена на рисунке 1.

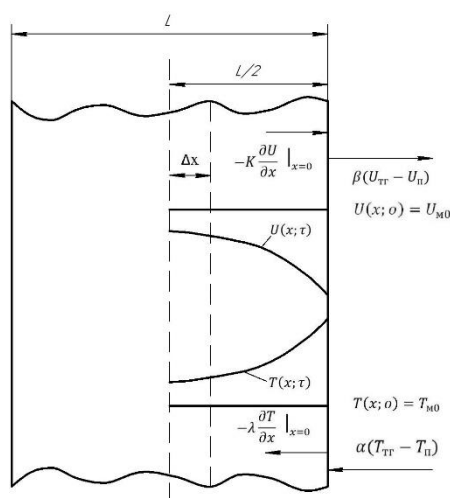


Рисунок 1 - Схема краевых и граничных условий конвективной сушки.

Как видно из краевых условий (рисунок 3) при конвективной сушке влага стремится на поверхность, а теплота сушильного агента в глубь материала.

Анализ литературных данных [2] показал, что: $a_T = f(U)$, при этом $U = f(T)$ (рис. 2).

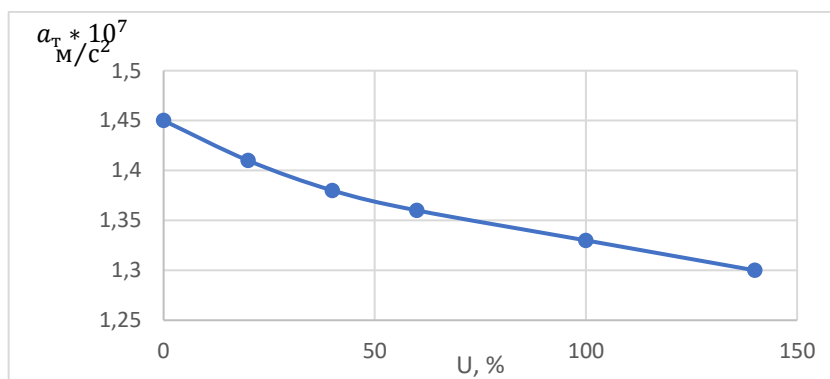


Рисунок 2 - Зависимость коэффициента температуропроводности от влажности вторичного высушиваемого материала (сосновой щепы)

Как видно из графика (рис. 4) с уменьшением влажности сосновый щепы коэффициент температуропроводности увеличивается как следствие интенсифицируется процесс прогрева. Методом наименьших квадратов было получено уравнение [3]:

Нахождение уравнения сводится к нахождению коэффициентов функции $K = hT + b$, где $h = \frac{K}{T}$; K - коэффициента влагопроводности, T - температура в любой точке, b - точка пересечения оси ординат.

Результаты

Методом конечных разностей с использованием языка визуального и объектно-ориентированного программирования VBA было проведено математическое моделирование процесса конвективной сушки сосновой щепы и построены графики (рисунки 3-5) [4].

На рисунке 3 представлены кинетические кривые изменения температуры материала по глубине.

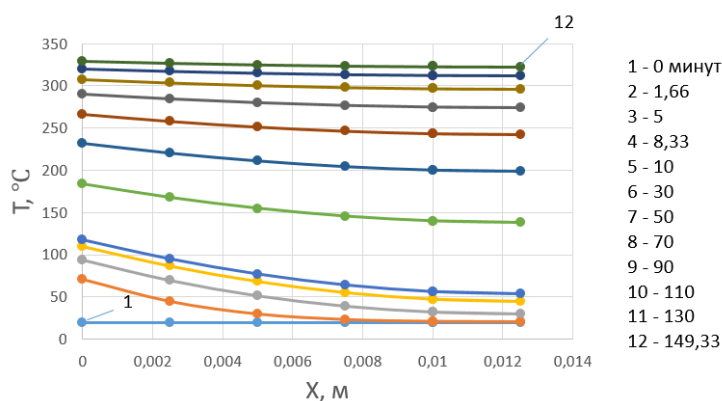


Рисунок 3 - Кинетические кривые температуры при сушке сосновой щепы.

На которых видно, что влажность материала сильно сказывается на прогрев материала по глубине. В момент начала прогрева разница температур поверхностного и центрального слоя составляет 50°C , по мере уменьшения содержания влаги в материале коэффициент температуропроводности увеличивается, и разница между поверхностным и центральным слоем уменьшается быстрее. Математическое моделирование проводилось при исходных данных: сырье сосновая щепа с линейным размером 25мм с температурой $T_{\text{м}0} = 20^{\circ}\text{C}$ и влажностью $U_{\text{м}0} = 50\%$, температура сушильного агента $T_{\text{г}0} = 350^{\circ}\text{C}$, конечная влажность $U_{\text{мк}} = 0\%$ [5]

На (рисунок 4) представлены кинетические кривые изменения влажности материала по глубине.

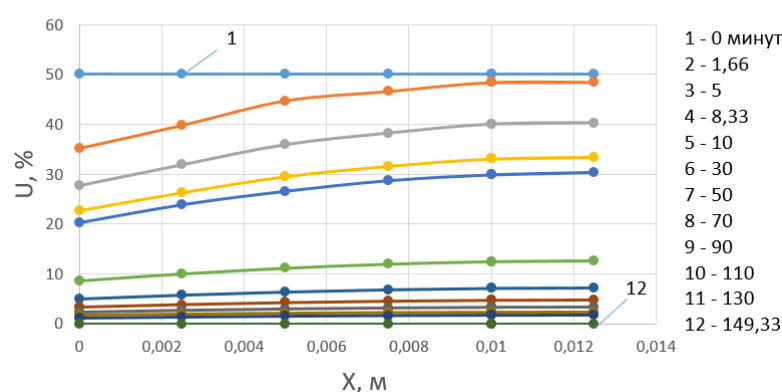


Рисунок 4 - Кинетические кривые влажности при сушке сосновой щепы

Из которых видно, что по мере уменьшения влажности в материале процесс сушки замедляется это связано с тем, что при влажности более 12 % из материала удаляется свободная влага, а при влажности менее 12 % связанная которая требует больше энергии и времени на испарение [6].

На (рисунок 5) кривая зависимости времени сушки от размера L сосновый щепы до нулевой влажности имеющая форму экспоненты.

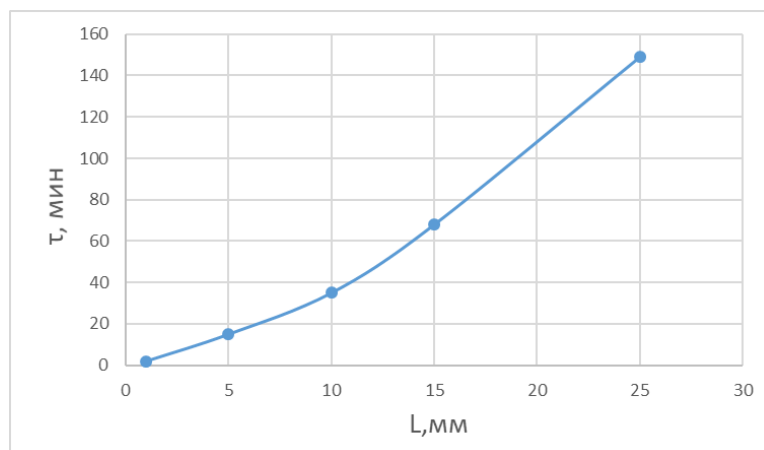


Рисунок 5 - Зависимость времени сушки от размеры сосновой щепы

Из этого графика можно сделать вывод что самым оптимальным размером щепы для сушки является 5-10 мм так как продолжительность сушки не занимает много времени и материал не пересушивается.

В результате математического моделирования установлено, что целесообразно вести сушку материала до влажности 12 % поскольку дальше процесс удаления влаги многократно замедляется. Оптимальная температура сушки 300-350 °С.

Заключение

Проведя математическое моделирование процесса сушки сосновой щепы с использованием программной среды Visual Basic for Applications, можно сделать следующие выводы. Что сушка до нулевой влажности нецелесообразна для процесса пиролиза, поскольку занимает много времени. С увеличением размера частиц время обработки увеличивается экспоненциально.

Построенное распределение влагосодержания по сечению частицы в различных временных слоях позволяет определить время сушки, от которого зависят конструктивные параметры аппаратного оформления процесса конвективной сушки.

Список литературы

1. Моделирование процесса сушки вторичного сырья в технологической линии производства активированного угля / Р. Г. Сафин, А. С. Родионов, В. Г. Сотников [и др.] // Лесной вестник. Forestry Bulletin. – 2023. – Т. 27, № 4. – С. 117-127. – DOI 10.18698/2542-1468-2023-4-117-127. – EDN PFDHFG.
2. Колесников, Г.Н. Кантышев, А.В. Зайцева, М.И. Конвективная сушка осинового заготовок малой толщины: модель и эксперименты / Лесной вестник. Forestry Bulletin. – 2019. – Т. 23. – № 3. – С. 87-94. – DOI 10.18698/2542-1468-2019-3-87-94.

3. Гороховский, А.Г. Шишкина, Е.Е. Старова, Е.В. Миков, А.А. Анализ процессов сушки древесины существенно неизотермическими режимами / Известия высших учебных заведений. Лесной журнал. – 2018. – № 2(362). – С. 88-96.
4. Сычевский, В. А. Моделирование технологического процесса конвективной сушки пиломатериалов / Известия Национальной академии наук Беларуси. Серия физико-технических наук. – 2018. – Т. 63. – № 4. – С. 424-434.
5. Зайцева, М.И. Никонова, Ю.В. Колесников, Г.Н. Моделирование изменений влажности древесины при атмосферной сушке / Ресурсосберегающие технологии, материалы и конструкции: Сборник статей по материалам региональной научно-практической конференции, Петрозаводск, 30 апреля 2020 года. – Петрозаводск: Петропресс, 2020. – С. 11-14.
6. Панова, Т.В. Панов, М.В. Теоретическое обоснование температурного поля в сушилке шахтного типа / Вклад науки и практики в обеспечение продовольственной безопасности страны при техногенном ее развитии: Сборник научных трудов международной научно-практической конференции, Брянск, 18–19 марта 2021 года. – Брянск: Брянский государственный аграрный университет, 2021. – С. 148-152.

References

1. Modeling of the secondary raw material drying process in the activated carbon production line / R. G. Safin, A. S. Rodionov, V. G. Sotnikov [et al.] // Forest Bulletin. - 2023. - Vol. 27, No. 4. - Pp. 117-127. - DOI 10.18698/2542-1468-2023-4-117-127. - EDN PFDHFG.
2. Kolesnikov, G. N. Kantyshev, A. V. Zaitseva, M. I. Convective drying of thin aspen billets: model and experiments / Forest Bulletin. - 2019. - Vol. 23. - No. 3. - Pp. – DOI 10.18698/2542-1468-2019-3-87-94.
3. Gorokhovskiy, A.G. Shishkina, E.E. Starova, E.V. Mikov, A.A. Analysis of wood drying processes under substantially non-isothermal conditions / News of higher educational institutions. Forestry magazine. – 2018. – No. 2(362). – P. 88-96.
4. Sychevsky, V.A. Modeling of the technological process of convective drying of lumber / News of the National Academy of Sciences of Belarus. Series of physical and technical sciences. – 2018. – V. 63. – No. 4. – P. 424-434.
5. Zaitseva, M.I. Nikonova, Yu.V. Kolesnikov, G.N. Modeling Changes in Wood Moisture Content during Atmospheric Drying / Resource-Saving Technologies, Materials and Designs: Collection of Articles Based on the Proceedings of the Regional Scientific and Practical Conference, Petrozavodsk, April 30, 2020. - Petrozavodsk: Petropress, 2020. - P. 11-14.
6. Panova, T.V. Panov, M.V. Theoretical Justification of the Temperature Field in a Shaft-Type Dryer / The Contribution of Science and Practice to Ensuring Food Security of the Country in the Event of Its Man-Made Development: Collection of Scientific Papers of the International Scientific and Practical Conference, Bryansk, March 18-19, 2021. - Bryansk: Bryansk State Agrarian University, 2021. - P. 148-152.