

Д. Ф. Зиятдинова, Е. Н. Соловьева, Л. Р. Назипова,
А. В. Сафина, К. В. Валеев, Р. Г. Сафин

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ВЛАГОПОГЛОЩЕНИЯ ДРЕВЕСИНЫ ПРИ ИЗМЕНЕНИИ ДАВЛЕНИЯ СРЕДЫ

Ключевые слова: растительное сырье, изменение давления среды, математическая модель, моделирование.

На основе дифференциальных уравнений материального баланса в герметичной камере и тепломассопереноса в исследуемом объекте при заданных краевых условиях разработана математическая модель, описывающая технологические процессы протекающие с изменением давления среды. Представлена методика проведения экспериментальных исследований процесса насыщения материала в установке, работающей в периодическом режиме при меняющемся давлении среды. В качестве модельного материала для экспериментальных исследований взят шпон березы, тепло- и массопроводные характеристики которого широко известны. Подготовка эксперимента заключалась в изготовлении образцов насыщенного материала, в виде пластин прямоугольной формы с размерами 30*90 мм и толщиной 4 мм. Результаты физического и математического моделирования отражены в виде профилей изменения влагосодержания и температуры по сечению материала в процессе насыщения. Установлено, что активный процесс насыщения шпона влагой при меняющемся давлении среды наблюдается в течении первых 15 минут, а температура в центре материала превышает 120 °С. Результаты математического моделирования получены с использованием программной среды Visual Basic for Applications. Расхождение между расчетными и экспериментальными данными не превышает 15%. Разработанная математическая модель процесса позволяет при вариации мощностей источников (парогенератора) и стоков (конденсатора и вакуумного насоса) рекомендовать режимы ведения технологического процесса или подбирать мощности парогенератора и насоса в соответствии с требуемым законом изменения давления в технологическом процессе. Для физического моделирования исследуемого процесса при переработке древесного сырья создана экспериментальная установка, на которой получены экспериментальные данные, подтверждающие адекватность разработанной модели.

D. F. Ziatdinova, E. N. Solov'yova, L. R. Nazipova,
A. V. Safina, K. V. Valeev, R. G. Safin

MODELING OF WOOD MOISTURE ABSORPTION PROCESSES UNDER CHANGING MEDIA PRESSURE

Keywords: plant raw materials, media pressure change, mathematical model, modeling.

On the basis of differential equations of material balance in a hermetic chamber and heat and mass transfer in the object under study under given boundary conditions, a mathematical model describing technological processes occurring with changes in medium pressure has been developed. The methodology of experimental studies of the process of material saturation in a unit operating in a periodic mode at varying medium pressure is presented. Birch veneer is taken as a model material for experimental studies, the heat and mass transfer characteristics of which are widely known. The preparation of the experiment consisted in the production of samples of the saturated material, in the form of rectangular plates with dimensions of 30 * 90 mm and a thickness of 4 mm. The results of physical and mathematical modeling are reflected in the form of profiles of changes in moisture content and temperature along the cross section of the material during saturation. It is established that the active process of saturation of the veneer with moisture under changing medium pressure is observed during the first 15 minutes, and by this time the temperature in the center of the material exceeds 120 °C. The results of mathematical modeling were obtained using the Visual Basic for Applications software environment. The discrepancy between the calculated and experimental data does not exceed 15%. The developed mathematical model of the process makes it possible, when the capacities of sources (steam generator) and drains (condenser and vacuum pump) vary, to recommend the modes of conducting the technological process or to select the capacities of the steam generator and pump in accordance with the required law of pressure change in the technological process. For physical modeling of the investigated process in the processing of wood raw materials, an experimental setup was created, on which experimental data confirming the adequacy of the developed model were obtained.

Введение

На многих предприятиях агропромышленного и лесопромышленного комплексов переработка материалов реализуется при изменении давления среды. Изменение давления среды сопровождается испарительным охлаждением материала, а при сбросе давления происходит разволокнение, разделение перерабатываемых продуктов. Эти явления отмечаются при проведении технологических процессов: сушки ягод и плодов в вакуум-осциллирующем режиме [7,12], замораживании плодов облепихи [6,8], охлаждении концентрированного сока [4,9], охлаждении

экстракта при производстве бетулина [10,13], кристаллизации и концентрировании растворов при производстве бетулина [14], измельчении влажных материалов [11,15], пропарки или пропитки пиломатериалов перед резанием, термодификации древесных материалов, варки целлюлозы, гидролиза древесины, выщелачивании ценных компонентов из древесных материалов и растительного сырья [2,3,5].

Эффект от изменения давления среды зависит от свойств перерабатываемого продукта и интенсивности изменения внешних факторов. Повышение давления сопровождается увеличением внутренней энергии в объекте воздействия. При

понижении давления эта энергия высвобождается в виде испаренной влаги. Мгновенное испарение влаги внутри влажного материала ведет к его разрушению. В зависимости от вида технологического процесса испарение влаги ведёт к понижению температуры (испарительное охлаждение), изменению концентрации экстракта или раствора. При быстром снижении (сбросе) давления среды испарение сопровождается молярным переносом жидкости из продуктов, характеризуемое коэффициентом Флеййснера. При этом количество удаленной влаги из материала будет выше, чем при простом испарении за счет уменьшения внутренней энергии. Объемное вскипание жидкости внутри материала при сбросе давления вызывает перепад давления, ведущий к изменению структуры перерабатываемого материала. Разрушение материала происходит по поверхностям с наименьшим сопротивлением к разрыву.

Для выявления рациональных параметров технологических процессов, протекающих при изменении давления среды, необходимо иметь математическое описание соответствующих процессов на основе теорий тепломассопереноса.

Физическая картина технологических процессов, протекающих при изменении давления среды выглядит следующим образом. Изменение давления среды над поверхностью материала смещает динамическое равновесие системы, описываемой уравнением Клайперона-Менделеева. Релаксация системы обеспечивается испарением или конденсацией части жидкости в адиабатических условиях за счет изменения внутренней энергии влажных частиц или экстракта. Релаксация системы сопровождается изменением технологических параметров: концентрации, пористости, температуры объекта исследования. Характер изменения этих параметров зависит от конкретного процесса переработки продукта и обусловлен структурой и характером связи матрицы с дисперсной фазой.

Материалы и методы исследования

В качестве модельного материала для экспериментальных исследований взят шпон березы, тепло- и массопроводные характеристики которого широко известны. Подготовка эксперимента заключалась в изготовлении образцов насыщенного материала, в виде пластин прямоугольной формы с размерами 30*90 мм и толщиной 4 мм.

Подготовленные 6 образцов пластин помещали в экспериментальную установку и насыщали водяным паром, после чего поочередно извлекали образцы в течении 15 минут и взвешивали.

Для физического моделирования технологического процесса, протекающего при изменении давления среды, создана экспериментальная установка. На рис. 1,2 представлена схема и внешний вид установки, работающей в периодическом режиме при меняющемся давлении среды.

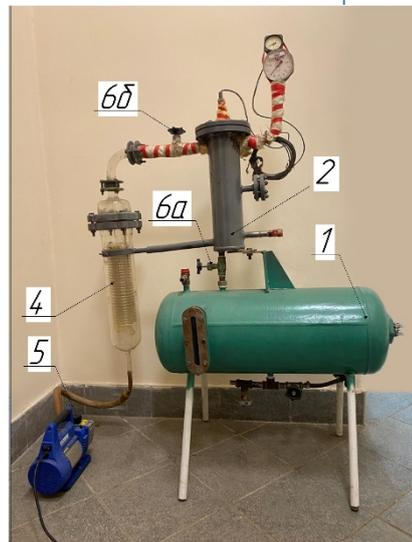
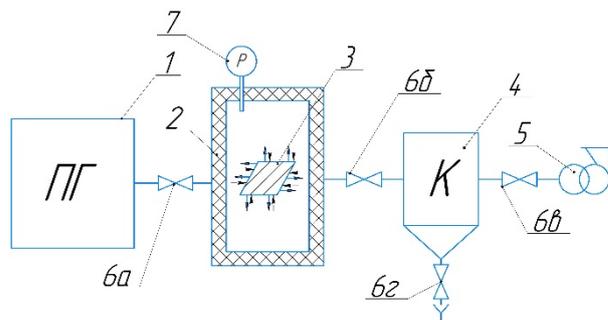


Рис. 1 - Схема и внешний вид экспериментальной установки, работающей при меняющемся давлении паровой среды

Fig. 1 - Schematic and external view of the experimental setup operating at varying pressure of the vapor medium

Установка состоит из: парогенератора 1; герметичной камеры 2, в которой располагается обрабатываемый продукт 3; конденсатора паров 4; вакуумного насоса 5; клапанов 6а, 6б, 6в, 6г.

Повышение давления среды в данной установке производится с помощью парогенератора при открытом клапане 6а и закрытом клапане 6б. Понижение давления среды производится системой откачки парогазовой смеси, состоящей из конденсатора 4 и вакуумного насоса 5 при закрытых клапанах 6а и 6г. После удаления неконденсирующихся газов вакуумный насос может отключаться закрытием клапана 6в.

Материальный баланс для рассматриваемого процесса описывается соотношениями:

$$Q_{пг}\rho_{п}dt \pm jFdt - Q_{к}\rho_{п}dt = V_0d\rho_{п}, \quad (1)$$

$$-Q_{н}\rho_{г}dt = V_0d\rho_{г}, \quad (2)$$

где $Q_{пг}, Q_{к}, Q_{н}$ – объёмная производительность, соответственно, парогенератора, конденсатора, вакуумного насоса $\left[\frac{м^3}{с}\right]$;

$\rho_{п}, \rho_{г}$, – плотность, соответственно, пара, газа $\left[\frac{кг}{м^3}\right]$;

F – поверхность частиц $[м^2]$;

j – интенсивность стока (притока) пара из перерабатываемого продукта $\left[\frac{\text{кг}}{\text{м}^2\text{с}}\right]$;
 V_0 – свободный объём камеры $[\text{м}^3]$;
 τ – время $[\text{с}]$.

Плотность пара (газа) определяется соотношением:

$$\rho_{п(г)} = \frac{\mu_{п(г)} \cdot P}{R \cdot T}. \quad (3)$$

Производительность парогенератора определяется мощностью тендов N $[\text{Вт}]$ и скрытой теплотой парообразования r $\left[\frac{\text{Дж}}{\text{кг}}\right]$.

$$Q_{пг} = \frac{N}{\rho_{п}} \cdot r. \quad (4)$$

Производительность конденсатора рассчитывается по соотношению:

$$Q_{к} = \frac{K \cdot \Delta T \cdot F_{к}}{\rho_{п} \cdot [C_{п}(T - T_{н}) + r]}, \quad (5)$$

где K – коэффициент теплопередачи $\left[\frac{\text{Дж}}{\text{м}^2 \cdot \text{с} \cdot \text{C}}\right]$; $F_{к}$ – поверхность конденсатора $[\text{м}^2]$; ΔT – средний температурный напор $[\text{C}]$; $C_{п}$ – теплоёмкость пара $\left[\frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{C}}\right]$.

Объёмная производительность системы удаления газа зависит от конструкции вакуум-насоса, для ротационного вакуум-насоса определяется соотношением:

$$Q_{н} = Q_0 \left(1 - k \frac{P_{атм}}{P}\right), \quad (6)$$

где k – коэффициент учитывающий производительность насоса, Q_0 – производительность насоса при атмосферном давлении.

Подставив (6) в (1) и (2) получаем соотношения, устанавливающие зависимость парциального давления от температуры:

$$\frac{dP_{п}}{d\tau} = \frac{F \cdot R \cdot T}{V_0 \cdot \mu_{п}} \cdot j - \rho_{п} \left(\frac{Q_{к}}{V_0} - \frac{1}{T} \cdot \frac{dT}{d\tau}\right), \quad (7)$$

$$\frac{dP_{г}}{d\tau} = \rho_{г} \left(\frac{1}{T} \cdot \frac{dT}{d\tau} - \frac{Q_{н}}{V_0}\right). \quad (8)$$

Температура насыщения рассчитывается в соответствии с уравнением Антуана:

$$T_{н} = \frac{B}{A - C_{н} \cdot P}, \quad (9)$$

где A, B – постоянные коэффициенты, зависящие от свойств испаряемой жидкости.

Интенсивность стока или притока пара определяется решением уравнения тепло-массопереноса, которое применительно к бесконечной пластине можно записать соотношениями:

$$\frac{\partial U}{\partial \tau} = a_m \cdot \frac{\partial^2 U}{\partial x^2} + \delta a_m \cdot \frac{\partial^2 T}{\partial x^2}, \quad (10)$$

$$\frac{\partial T}{\partial \tau} = a_T \cdot \frac{\partial^2 T}{\partial x^2}. \quad (11)$$

где a_m – коэффициент массопроводности $\left[\frac{\text{м}^2}{\text{с}}\right]$,

a_T – коэффициент температуропроводности $\left[\frac{\text{м}^2}{\text{с}}\right]$,

U – влагосодержание $\left[\frac{\text{кг}}{\text{кг}}\right]$;

δ – термоградиентный коэффициент $\left[\frac{\%}{\text{К}}\right]$ [12].

при начальных условиях:

$$U(x,0) = U_{н}; \quad T(x,0) = T_{н}. \quad (12)$$

при граничных условиях:

$$U(0,\tau) = a \left(\frac{P_{н}}{P}\right)^n; \quad T(0,\tau) = T \quad (13)$$

где a, n – эмпирические константы в уравнении Фрейндлиха.

Интенсивность определяется соотношением:

$$j = \frac{\partial U}{\partial \tau} \Big|_{x=0} \cdot \frac{1}{f}, \quad (14)$$

где f – удельная поверхность $\left[\frac{\text{м}^2}{\text{кг}}\right]$.

Результаты

На рис. 2 представлена экспериментальная кривая изменения массы образца в процессе насыщения.

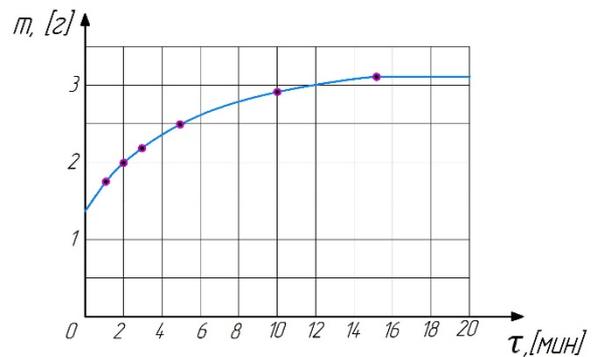


Рис. 2 - Кинетика насыщения шпона

Fig. 2 - Kinetics of veneer saturation

Анализ кривой показывает, что насыщение образцов происходит за 15 минут. Таким образом, процесс насыщения целесообразно ограничить 15 минутами.

На рис. 3 представлены расчетные и экспериментальные данные по кинетике интенсивности влагопоглощения.

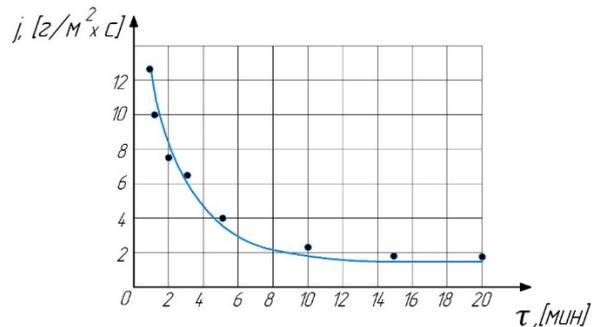


Рис. 3 - Кинетика интенсивности влагопоглощения

Fig. 3 - Kinetics of moisture absorption intensity

Анализ кривой показал, что интенсивность влагопоглощения в начале процесса резко возрастает до $12,2 \frac{\text{г} \cdot \text{м}^2}{\text{с}}$ и затем экспоненциально понижается.

На рис.4 приведены расчетные и экспериментальные данные по кинетике влагопоглощения.

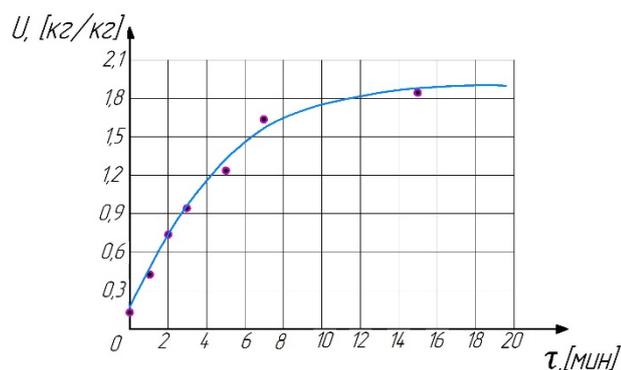


Рис. 4 - Кинетическая кривая процесса влагопоглощения древесного сырья

Fig. 4 - Kinetic curve of wood raw material moisture absorption process

Расхождение между расчетными и экспериментальными данными не превышает 15%, поэтому считаем, что математическая модель адекватно отражает реальный процесс.

На рис.5 приведены расчетные кинетические зависимости давления пара в герметичной емкости при различных мощностях парогенератора. Расчетные кривые получены решением системы дифференциальных уравнений массопереноса (7), (8) в соответствии с вышеприведенным алгоритмом расчета. Эти зависимости позволяют подбирать мощность парогенератора в соответствии с требуемым законом изменения давления в технологическом процессе.

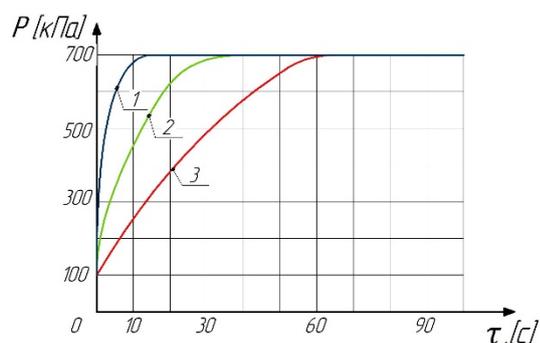


Рис. 5 - Зависимость давления во времени при разных мощностях парогенератора: 1 – N = 9 кВт, 2 – N = 6 кВт, 3 – N = 3 кВт

Fig. 5 - Pressure dependence in time at different steam generator powers: 1 - N = 9 kW, 2 - N = 6 kW, 3 - N = 3 kW

Моделирование технологического процесса, протекающего с изменением давления среды, проведено методом конечных разностей с использованием языка визуального и объектно-ориентированного программирования Visual Basic for Applications.

Заключение

На основе дифференциальных уравнений материального баланса в герметичной камере и теплопереноса в исследуемом объекте при заданных краевых условиях разработана математическая модель, описывающая процесс влагопоглощения протекающий с изменением давления среды.

Разработанная математическая модель позволяет при вариации мощностей источников (парогенератора) и стоков (конденсатора и вакуумного насоса) рекомендовать режимы ведения технологического процесса или подбирать мощности парогенератора и насоса в соответствии с требуемым законом изменения давления в технологическом процессе.

Для физического моделирования исследуемого процесса при переработке древесного сырья создана экспериментальная установка, на которой получены экспериментальные данные, подтверждающие адекватность разработанной модели.

Литература

1. А.В. Лыков. Сушка древесины, Издательство КНИТУ. 1968.
2. А. В. Сафина, Д. Ф. Зиятдинова, Н. Ф. Тимербаев, Р. Г. Сафин, Т. О. Степанова, Издательство КНИТУ 288 (2017).
3. В.А. Левданский, Получение кверцетина из древесины лиственницы в условиях «взрывного» автогидролиза в присутствии бисульфита магния, Химия растительного сырья. - 2008. - № 4. с. 55 – 58
4. В. Ю. Овсянников, А. А. Арсланова, А.И. Ключников, Н.Н. Лобачева, *ИОР: EES*, Том 839, Красноярск (2021)
5. Д. Б. Просвириков, Р. Г. Сафин, Д. Ш. Гайнуллина, Т. Д. Просвирикова, Исследование процесса делигнификации древесины, предварительно активированной паровзрывной обработкой, Вестник Технологического университета (2015) – Т. 18, № 22. – С. 103-106.
6. И. А. Короткий, Е. В. Короткая, В. В. Киреев *FRM*., Vol. 4, No.1 (2016).
7. Пат. РФ 2.541.395 (2013).
8. Пат. РФ 2.421.976 С1 (2011)
9. Пат. РФ 2.794.158 (2022)
10. Патент РФ 2.801.732 (2023)
11. Пат. РФ № 2.792.374 (2023)
12. Р. Р. Сафин, С. Р. Мухаметзянов, В. В. Губернаторов, 3th IOP, Vol. 666. (2019).
13. Paže. Paže, J. Zandersons, J. Rižikovs *BF*. Vol. 20. No. 1. - P. 88-97 (2014).
14. Zh. Yu-Hong, Yu. Tao, W. Yang. *JFR*. Vol. 14, No. 3. - P. 202-204 (2003).
15. Yasushi HIRAMATSU, Atsushi MIYATAKE, Tsuyoshi FUJII, Yi Min WEI, Bunichiro TOMITA, *JAS*. Vol. 13, P. 146-150.(2001)

References

1. A.V. Lykov. Drying of wood, KNRTU Publishing House. 1968.
2. A. V. Safina, D. F. Ziatdinova, N. F. Timerbaev, R. G. Safin, T. O. Stepanova, KNRTU Publishing House 288 (2017).
3. V.A. Levdansky, Preparation of quercetin from larch wood under conditions of "explosive" autohydrolysis in the presence of magnesium bisulfite, Chemistry of Plant Raw Materials. - 2008. - No. 4. P. 55 - 58

4. V. Yu. Ovsyannikov, A. A. Arslanova, A. I. Klyuchnikov, N. N. Lobacheva, IOP: EES, Vol. 839, Krasnoyarsk (2021)
5. D. B. Prosvirnikov, R. G. Safin, D. Sh. Gainullina, T. D. Prosvirnikova, Investigation of the delignification process of wood pre-activated by vapor blast treatment, Vestnik Technological University (2015) - Vol. 18, No. 22. - P. 103-106.
6. I. A. Korotkiy, E. V. Korotkaya, V. V. Kireev FRM., Vol. 4, No.1 (2016).
7. Pat. RF 2.541.395 (2013).
8. Pat. RF 2.421.976 C1 (2011).
9. Pat. RF. 2.794.158 (2022)
10. Pat. RF. 2,801,732 (2023)
11. Pat. RF 2.792.374 (2023)
12. R. R. Safin, S. R. Mukhametzyanov, V. V. Gubernatorov, 3rd IOP, Vol. 666. (2019).
13. Paže. Paže, J. Zandersons, J. Rižikovs BF. Vol. 20. No. 1. - P. 88-97 (2014).
14. Zh. Yu-Hong, Yu. Tao, W. Yang. JFR. Vol. 14, No. 3. - P. 202-204 (2003).
15. Yasushi HIRAMATSU, Atsushi MIYATAKE, Tsuyoshi FUJII, Yi Min WEI, Bunichiro TOMITA, JAS. Vol. 13, P. 146-150.(2001)

© **Д. Ф. Зиятдинова** – профессор кафедры переработки древесных материалов, КНИТУ, e-mail: ziatdinova2804@gmail.com; **Е. Н. Соловьева** – асп. кафедры переработки древесных материалов, КНИТУ, e-mail: sfornvi@gmail.com; **Л. Р. Назипова** – магистрант кафедры переработки древесных материалов, КНИТУ, e-mail: lnazipova@internet.ru; **А. В. Сафина** – доцент кафедры архитектуры и дизайна изделий из древесины, КНИТУ, e-mail: alb_saf@mail.ru; **К. В. Валеев** – доцент кафедры переработки древесных материалов, КНИТУ, e-mail: kirval116@mail.ru; **Р. Г. Сафин** – профессор кафедры переработки древесных материалов, КНИТУ, e-mail: safin@kstu.ru.

© **D. F. Ziatdinova** – Professor, Department of Wood Materials Processing (WMP), Kazan National Research Technological University (KNRTU), e-mail: ziatdinova2804@gmail.com; **E. N. Soloveva** – PhD-student, the WMP department, KNRTU, e-mail: sfornvi@gmail.com; **L. R. Nazipova** – Master-student, the WMP department, KNRTU, e-mail: lnazipova@internet.ru; **A. V. Safina** – Associate Professor, Departments of Architecture and Design of Wood Products, KNRTU, e-mail: alb_saf@mail.ru; **K. V. Valeev** – Associate Professor, the WMP department, KNRTU, e-mail: kirval116@mail.ru; **R. G. Safin** – Professor, the WMP department, KNRTU, e-mail: safin@kstu.ru.