

УДК 676.1.054.1

DOI: 10.37482/0536-1036-2020-5-176-183

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ПОЛУЧЕНИЯ ДРЕВЕСНОВОЛОКНИСТЫХ ПОЛУФАБРИКАТОВ В ЦЕЛЯХ РАСШИРЕНИЯ СЫРЬЕВОЙ БАЗЫ ЛЕСОПРОМЫШЛЕННЫХ ПРЕДПРИЯТИЙ

М.А. Зырянов, канд. техн. наук, доц.; ResearcherID: [N-6950-2016](#),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4525-2124>

С.О. Медведев, канд. экон. наук; ResearcherID: [N-8240-2016](#),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7459-3150>

Лесосибирский филиал Сибирского государственного технологического университета науки и технологий им. академика М.Ф. Решетнева, ул. Победы, д. 29, г. Лесосибирск, Красноярский край, Россия, 662543; e-mail: zuryanov13@mail.ru, medvedev_serega@mail.ru

В настоящее время материалы из древесноволокнистых полуфабрикатов нашли широкое применение в домостроении в качестве конструкционных, отделочных и изоляционных. Как показал анализ результатов многочисленных исследований, сырьем для их производства служит технологическая щепка из отходов деревообработки, которая подвергается гидротермической обработке и дальнейшему размолу в дисковых ножевых размалывающих машинах в две ступени. Значительная энергоемкость процесса производства древесного волокна обусловлена не только использованием 2-ступенчатого размола, но и преодолением гидродинамического сопротивления водной среды, где осуществляется размол. В ходе решения задачи расширения сырьевой базы для производства древесноволокнистого полуфабриката и снижения энергоемкости процесса размола был исследован размол щепы из порубочных остатков в аэродинамической среде на модернизированной планко-крестовой мельнице. Проанализированы особенности этого процесса и дана оценка его эффективности. Установлено влияние продолжительности выдержки щепы из порубочных остатков в растворе уксусной кислоты, величины рабочего зазора и угла наклона передней грани ножа на степень помола и фракционный показатель качества помола древесной массы. Получены статистическо-математические уравнения, описывающие исследуемый процесс, и построены графические зависимости, для которых выполняется следующее основное требование: экспериментальные точки в совокупности должны располагаться достаточно близко к кривым. Данные уравнения позволяют прогнозировать качество древесноволокнистой массы в зависимости от установленных режимов процесса размола, а также при известных значениях технологических и конструктивных параметров размалывающей установки определять ее показатели. Подтверждена эффективность процесса получения древесноволокнистого полуфабриката в аэродинамической среде из щепы, произведенной в результате переработки порубочных остатков (ветви, ветки и сучья) в мобильной рубительной машине.

Для цитирования: Зырянов М.А., Медведев С.О. Моделирование процессов получения древесноволокнистых полуфабрикатов в целях расширения сырьевой базы лесопромышленных предприятий // Изв. вузов. Лесн. журн. 2020. № 5. С. 176–183. DOI: 10.37482/0536-1036-2020-5-176-183

Финансирование: Исследование выполнено при поддержке гранта Президента РФ для молодых ученых – кандидатов наук МК-1902.2019.6; проект «Разработка и внедрение эффективной технологии комплексной переработки лесосечных отходов» проведен при поддержке Красноярского краевого фонда науки.

Ключевые слова: фибриляция, степень помола, щепка, волокно, порубочные остатки, математическая модель, размол.

Введение

В связи с тем, что потребность в древесном сырье постоянно возрастает, актуальным становится вопрос о комплексном использовании древесины. Удовлетворение потребности деревоперерабатывающих производств в сырье должно осуществляться как за счет экономного, так и наиболее полного использования древесных ресурсов [1, 7–9, 20]. К основным направлениям развития лесного комплекса относят увеличение процента использования всей древесной массы. С этой целью необходимо дальнейшее совершенствование структуры производства лесной и деревообрабатывающей промышленности, технологических процессов производства щепы, древесноволокнистых плит, фанеры, картона и других заменителей пиломатериалов. Одним из приоритетных направлений является производство древесноволокнистого полуфабриката из лесосечных отходов в виде сучьев, ветвей и вершинок. Однако традиционные технологии размола и существующее размалывающее оборудование не позволяют получить древесноволокнистый полуфабрикат из этих отходов с требуемыми качественными характеристиками [2–6].

Объекты и методы исследования

Для расширения сырьевой базы получения древесноволокнистого полуфабриката и повышения эффективности процесса размола отходов растительного происхождения в лаборатории лесоперерабатывающей целлюлозно-бумажной и химической технологии древесины филиала СибГТУ в г. Лесосибирске была разработана конструкция планко-крестовой мельницы, позволяющей осуществлять процесс ножевого размола в аэродинамической среде. На размольную установку получено положительное решение № 2673858 «Устройство для размола щепы в аэродинамической среде».

Размольная камера установки (рис. 1) выполнена из стойких к коррозии и абразивному износу композиционных материалов. Ввиду конструктивных особенностей камеры, отличающих ее от современных дисковых размалывающих машин [10, 14, 16], процесс размола протекает в четырех зонах (I–IV) без присутствия технической воды. В зоне II размол осуществляется в рабочем зазоре между ножами ротора и ножами рифленой планки статора. Происходит интенсивное воздействие на волокнистый полуфабрикат, которое сопровождается раздавливанием, резанием, мятием и трением. В секторе между ножами ротора (зона I) древесноволокнистая масса перемешивается за счет сил трения и центробежной силы, что способствует фибриллированию древесного волокна. В зоне III, расположенной у основания ножа ротора с ножевыми отверстиями, происходит фибриллирование древесного волокна благодаря острым зубьям в ножевых отверстиях, в межножевых ячейках рифленых планок (зона IV) – фибриллирование, выравнивание геометрических размеров волокна и разделение древесноволокнистой массы по фракциям благодаря ножевым отверстиям. Зона IV является завершающей, при этом древесноволокнистый полуфабрикат, имеющий требуемые геометрические размеры, проходит через ножевые отверстия и покидает размольную камеру.

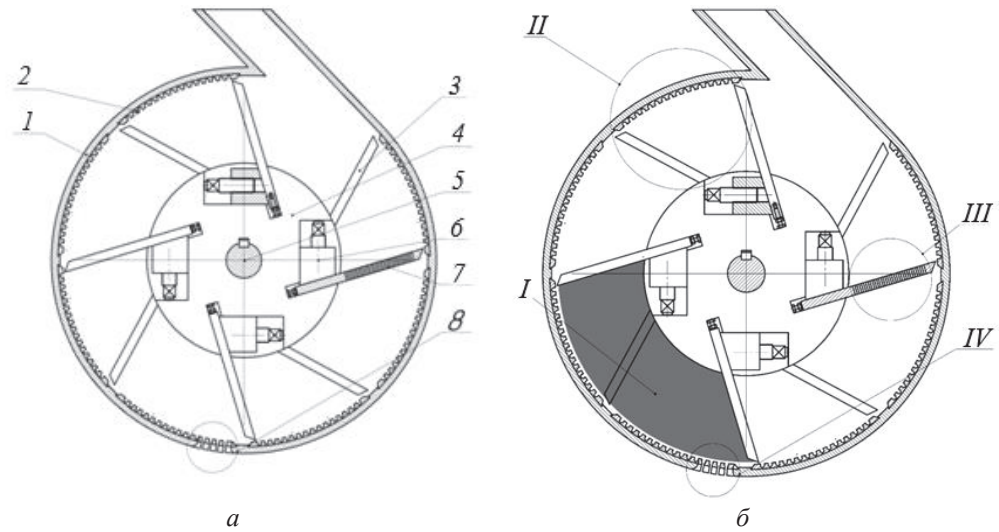


Рис. 1. Размольная камера планко-крестовой мельницы (а) с указанием зон размола (б): 1 – корпус размольной камеры; 2 – рифленая планка статора; 3 – нож ротора; 4 – корпус составной гарнитуры ротора; 5 – вал ротора; 6 – прижимная планка; 7 – ножевые отверстия сепараторов ножей ротора; 8 – ножевые отверстия сепараторов рифленой планки; I–IV – зоны

Fig. 1. Grinding chamber of a cross-bar mill (a) with an indication of grinding zones (b): 1 – grinding chamber body; 2 – stator corrugated bar; 3 – rotor knife; 4 – housing of the composite rotor set; 5 – rotor shaft; 6 – clamping bar; 7 – knife holes of the rotor knife separators; 8 – knife holes of the corrugated bar separators; I–IV – zones

В исследованиях использовалась сосновая щепка, полученная из порубочных остатков в виде ветвей, сучьев и вершин. Длина и толщина щепы варьировались в диапазонах 10...35 мм и 3...5 мм соответственно, угол среза составлял 35...55°, массовая доля коры и гнили не превышала 15 и 5 % соответственно.

На основании анализа результатов теоретических и экспериментальных исследований [11–13, 15, 17–19] повышение реакционной способности древесины и ослабление межволоконных связей достигались не традиционно за счет гидротермической обработки щепы паром, а посредством предварительной обработки щепы 70 %-м водным раствором уксусной кислоты при температуре 55...60 °С.

Основной метод получения статистически-математического описания исследуемого процесса – активный многофакторный эксперимент с использованием В-плана второго порядка [4, 5]. В качестве входных факторов были выбраны: величина рабочего зазора (z), угол наклона передней грани ножа (γ), продолжительность выдержки щепы в водном растворе уксусной кислоты (τ), выходных параметров – основные качественные показатели древесноволокнистой массы: степень помола древесной массы (ДС), фракционный показатель качества помола (Fr).

Выбор основных характеристик моделей, согласно программе экспериментальных исследований, представлен в виде функциональной зависимости

$$\text{ДС, Fr} = f(z, \gamma, \tau). \quad (1)$$

На основании предварительных экспериментов были приняты следующие интервалы варьирования входных параметров: $0,2 \leq z \leq 0,6$ мм; $30^\circ \leq \gamma \leq 50^\circ$; $10 \leq \tau \leq 30$ мин.

Результаты исследований и их обсуждение

В результате обработки экспериментальных данных с применением современной экспериментальной и лабораторно-измерительной базы на соответствующем уровне метрологического обеспечения исследований получены уравнения, описывающие изменение прироста степени помола и фракционного показателя качества помола от технологических и конструктивных параметров размалывающей машины:

$$\text{ДС} = 21,59 - 0,25\gamma - 2,2z + 1,95\tau + 0,44\gamma z - 0,19z\tau - 0,31\gamma\tau - 0,59\gamma^2 - 0,34z^2 - 0,09\tau^2; \quad (2)$$

$$\text{Fr} = 33,97 + 0,31\gamma - 2,1z + 1,93\tau + 0,34\gamma z - 0,09z\tau - 0,16\gamma\tau - 0,17\gamma^2 - 0,42z^2 + 0,03\tau^2. \quad (3)$$

Расчеты подтвердили, что все коэффициенты регрессионных уравнений значимы. Для наглядности и более полной оценки влияния исследуемых факторов на качественные показатели древесноволокнистого полуфабриката, по уравнениям (2) и (3) построены поверхности отклика, которые демонстрируют их зависимость от конструктивных и технологических параметров планко-крестовой мельницы (рис. 2).

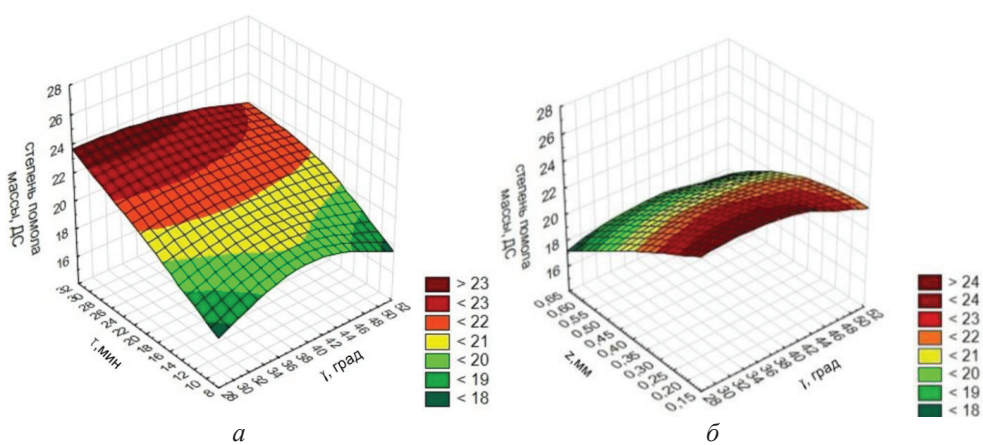


Рис. 2. Зависимость степени помола древесноволокнистой массы (ДС) от продолжительности выдержки (τ) щепы в водном растворе уксусной кислоты и угла наклона (γ) передней грани ножа ротора (*а*) и от величины рабочего зазора (z) и угла наклона (γ) передней грани ножа ротора (*б*)

Fig. 2. Dependence of the grinding degree (ДС) of wood pulp on the time of chips exposure (τ) in an acetic acid aqueous solution, the angle of inclination (γ) of the front face of the rotor knife (*а*) and the size of the working gap (z) and the angle of inclination (γ) of the front edge of the rotor knife (*б*)

Как видно из рис. 2, *а* и уравнения (2), при увеличении времени выдержки щепы в водном растворе уксусной кислоты повышается степень помола массы. Это обусловлено тем, что при более длительной выдержке щепы в водном растворе уксусной кислоты возрастает пластичность древесины.

В дальнейшем при механическом воздействии на древесину образуется большое количество мелочи. Так, при выдержке щепы в водном растворе уксусной кислоты от 18 до 20 мин степень помола массы достигает 20...22 ДС и имеет тенденцию к увеличению при более продолжительной выдержке.

На графике, представленном на рис. 2, б, видно, что при уменьшении величины рабочего зазора наблюдается тенденция к росту степени помола массы: при рабочем зазоре 0,3...0,4 мм значение показателя степени помола массы достигает 20...22 ДС.

При увеличении угла наклона передней грани ножа ротора степень помола массы возрастает и достигает своего максимального значения 20...21 ДС при $\gamma = 35...41^\circ$.

Анализ графиков, приведенных на рис. 3, и уравнения (3) показал, что с ростом продолжительности выдержки щепы в водном растворе уксусной кислоты и уменьшением величины рабочего зазора возрастает фракционный показатель качества помола древесноволокнистого полуфабриката.

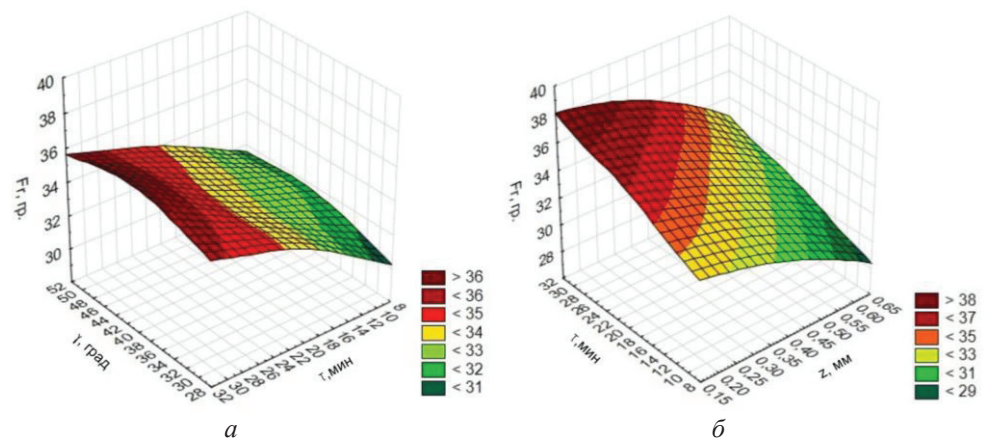


Рис. 3. Зависимость фракционного состава (Fr) древесноволокнистой массы от продолжительности выдержки (τ) щепы в водном растворе уксусной кислоты и угла наклона (γ) передней грани ножа ротора (а) и от величины рабочего зазора (z) и продолжительности выдержки (τ) щепы в водном растворе уксусной кислоты (б)

Fig. 3. Dependence of the fractional composition (Fr) of wood pulp on the time of chips exposure in an acetic acid aqueous solution and the angle of inclination (τ) of the front face of the rotor knife (а) and on the size of the working gap (z) and time of chips exposure (τ) in an acetic acid aqueous solution (б)

Таким образом, чем дольше щепка выдерживается в водном растворе уксусной кислоты и меньше величина рабочего зазора, тем больше древесноволокнистый полуфабрикат содержит древесной пыли и мелочи, что, в свою очередь, увеличивает значение фракционного показателя качества помола массы. С ростом угла наклона к передней грани ножа ротора значение фракционного показателя качества помола массы возрастает и достигает максимального – 35...36 г при $\gamma = 35...41^\circ$. С дальнейшим увеличением угла наклона передней грани ножа ротора значение фракционного показателя качества помола массы уменьшается.

Анализ результатов исследований показал, что оптимальными технологическими параметрами процесса получения древесноволокнистого полуфабриката являются: время выдержки в растворе уксусной кислоты – 18...20 мин,

величина рабочего зазора – 0,3...0,4 мм, угол наклона передней грани ножа – 35...41°.

Выводы

1. Статистическо-математические уравнения и графические зависимости, описывающие процесс размола щепы из отходов лесозаготовок в планко-крестовой мельнице, дают возможность прогнозировать получение качественного древесноволокнистого полуфабриката в зависимости от предложенных режимов процесса размола.

2. Установлены оптимальные режимные параметры, позволяющие выпускать древесноволокнистый полуфабрикат, имеющий наибольшие значения качественных показателей и пригодный для дальнейшего использования в производстве конструкционных, отделочных и изоляционных материалов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Безруких Ю.А., Медведев С.О., Алашкевич Ю.Д., Мохирев А.П. Рациональное природопользование в условиях устойчивого развития экономики промышленных предприятий лесного комплекса // Экономика и предпринимательство. 2014. № 12-2. С. 994–996. [Bezrukikh Yu.A., Medvedev S.O., Alashkevich Yu.D., Mokhirev A.P. Environmental Management in the Conditions for Sustainable Economic Development Industrial Forestry Complex Enterprises. *Ekonomika i predprinimatel'stvo* [Journal of Economy and Entrepreneurship], 2014, no. 12-2, pp. 994–996].

2. Гончаров В.Н. Теоретические основы размола волокнистых материалов в ножевых машинах: дис ... д-ра техн. наук. Л., 1990. 375 с. [Goncharov V.N. *Theoretical Framework of Refining Fibrous Materials in Knife Machines*: Dr. Eng. Sci. Diss. Leningrad, 1990. 375 p.].

3. Зырянов М.А., Дресвянкин И.А., Рубинская А.В. Экспериментально-теоретическое обоснование физико-химических превращений древесной биомассы в технологии производства древесноволокнистых плит // Инж. вестн. Дона. 2016. № 4. Ст. № 158. [Zyryanov M.A., Dresvyankin I.A., Rubinskaya A.V. Experimental and Theoretical Study of Physical and Chemical Transformations of Woody Biomass in the Production Technology of Fibreboard. *Inzhenernyy vestnik Dona* [Engineering Journal of Don], 2016, no. 4, art. 158].

4. Зырянов М.А., Чистова Н.Г., Лазарева Л.И. Совершенствование работы размольного участка производства древесноволокнистых плит мокрым способом // Химия растит. сырья. 2011. № 3. С. 193–196. [Zyryanov M.A., Chistova N.G., Lazareva L.I. Improving the Work of the Grinding Section of the Fiberboard Production by the Wet Method. *Khimija rastitel'nogo syr'ja* [Chemistry of plant raw material], 2011, no. 3, pp. 193–196].

5. Зырянов М.А., Чистова Н.Г., Швецов В.А., Зарипов З.З. Переработка древесных отходов в производстве древесноволокнистых плит // Вестн. КрасГАУ. 2010. № 4. С. 288–291. [Zyryanov M.A., Chistova N.G., Shvetsov V.A., Zaripov Z.Z. Wood Waste Processing for the Wood-Fiber Panels Production. *Vestnik KrasGAU* [The Bulletin of KrasGAU], 2011, no. 4, pp. 288–291].

6. Коротаев Э.И., Симонов В.И. Производство строительных материалов из древесных отходов. М.: Лесн. пром-сть, 1972. 144 с. [Korotayev E.I., Simonov V.I. *Production of Construction Materials from Wood Waste*. Moscow, Lesnaya promyshlennost' Publ., 1972. 144 p.].

7. Мохирев А.П., Аксенов Н.В., Шеверев О.В. О рациональном природопользовании и эксплуатации ресурсов в Красноярском крае // Инж. вестн. Дона. 2014. № 4-1. Ст. № 20. [Mokhirev A.P., Aksenov N.V., Sheverev O.V. On the Rational Management and Exploitation of Resources in the Krasnoyarsk Region. *Inzhenernyy vestnik Dona* [Engineering Journal of Don], 2014, no. 4-1, art. 20].

8. Никишов В.Д. Комплексное использование древесины. М.: Лесн. пром-сть, 1985. 261 с. [Nikishov V.D. *Integrated Wood Utilization*. Moscow, Lesnaya promyshlennost' Publ., 1985. 261 p.]

9. Чистова Н.Г., Петрушева Н.А., Алашкевич Ю.Д., Трофимук В.Н. Оптимизация процесса размола в производстве древесноволокнистых плит мокрым способом // Фундаментальные исследования. 2006. № 11. С. 38–40. [Chistova N.G., Petrusheva N.A., Alashkevich U.D., Trofimuk V.N. Optimization of Refining Process in Wetherdboard Production. *Fundamental'nyye issledovaniya* [Fundamental research], 2006, no. 11, pp. 38–40].

10. Bens O., Hüttl R.F. Energetic Utilisation of Wood as Biochemical Energy Carrier – A Contribution to the Utilisation of Waste Energy and Landuse. *International Journal of Thermal Sciences*, 2001, vol. 40, iss. 4, pp. 344–351. DOI: [10.1016/S1290-0729\(00\)01220-5](https://doi.org/10.1016/S1290-0729(00)01220-5)

11. Chorny O. Influence of the Bretton Woods Institutions on Economic Growth: Literature Survey for Transitional Economic Systems. *Economics & Sociology*, 2011, vol. 4, no. 2, pp. 32–41. DOI: [10.14254/2071-789X.2011/4-2/4](https://doi.org/10.14254/2071-789X.2011/4-2/4)

12. Ferguson W. Why Wood Pulp is the World's New Wonder Material. *New Scientist*, 2012, iss. 2878. 24 p.

13. *Forests and Forestry in Sweden*. Stockholm, KSLA, 2015. 24 p. Available at: <https://www.skogsstyrelsen.se/globalassets/in-english/forests-and-forestry-in-sweden2015.pdf> (accessed 22.06.19).

14. Goldstein J. Finding New Markets for Local Waste Wood. *BioCycle*, 2002, vol. 43, no. 12, pp. 30.

15. Hellen E. Beyond Paper and Board – Leap in Resource-Efficiency with Nanocellulose and New Forming Techniques. *Forestcluster Ltd's Annual Seminar*. Helsinki, 2011. 25 p.

16. Mokhirev A.P., Pozdnyakova M.O., Medvedev S.O., Mamatov V.O. Assessment of Availability of Wood Resources Using Geographic Information and Analytical Systems (the Krasnoyarsk Territory as a Case Study). *Journal of Applied Engineering Science*, 2018, vol. 16, iss. 3, pp. 313–319. DOI: [10.5937/jaes16-16908](https://doi.org/10.5937/jaes16-16908)

17. Shi S.Q., Gardner D., Pendleton D., Hoffard T. Timber Production from Reclaimed Creosote-Treated Wood Pilings: Economic Analysis and Quality Evaluation. *Forest Products Journal*, 2001, vol. 51, no. 11-12, pp. 45–50.

18. Wood Waste Reduction. *Pollution Prevention Institute*. Topeka, Kansas State University, 2006. 12 p.

19. Zozulya V.V., Sakhanov V.V., Medvedev S.O., Bezrukih Y.A., Romanchenko O.V. The Features of Industrial Modernization Management in Forest Complex. *Proceedings of the 17th International Multidisciplinary Scientific GeoConference Surveying Geology and Mining Ecology Management (SGEM 17), Albena, Bulgaria, June 29 – July 5, 2017*. Albena, SGEM, 2017, pp. 927–934.

20. Zozulya V.V., Romanchenko O.V., Zuykov A.V., Sergeeva A.Yu., Medvedev S.O., Zozulya I.V. Financial Stimulation of Forest Resources Deep Processing. *Journal of Advanced Research in Law and Economics*, 2017, vol. 8, no. 1, pp. 312–318.

MODELING THE PRODUCTION PROCESSES OF WOOD-FIBER SEMI-FINISHED PRODUCTS AIMED AT EXPANSION OF THE RAW MATERIAL BASE OF FOREST ENTERPRISES

M.A. Zyryanov, Candidate of Engineering, Assoc. Prof.; ResearcherID: [N-6950-2016](https://orcid.org/0000-0003-4525-2124)

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4525-2124>

S.O. Medvedev, Candidate of Economics; ResearcherID: [N-8240-2016](https://orcid.org/0000-0001-7459-3150)

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7459-3150>

Lesosibirsk Branch of Reshetnev Siberian State University of Science and Technology, ul. Pobedy Street, 29, Lesosibirsk, 662543, Russian Federation;
e-mail: zuryanov13@mail.ru, medvedev_serega@mail.ru

Currently, materials made of wood-fiber semi-finished products are widely used in house building as structural, finishing and insulating materials. According to the results analysis of numerous studies, the raw material for their production is technological chips of woodworking waste. While production, the chips are subjected to hydrothermal treatment and further grinding in disk knife grinding machines in two stages. Significant energy consumption of the wood fiber production process is driven not only by grinding wood chips in stages, but also by overcoming the hydrodynamic resistance of the aqueous environment, where grinding is carried out. The process of grinding wood chips, made of from chopping residues, in an aerodynamic medium on an upgraded cross-bar mill was studied in order to solve the problem of expanding the raw material base for the production of a wood fiber semi-finished product and reducing the energy intensity of the grinding process. The features of this process were analyzed and its effectiveness was assessed. The influence of the exposure time of wood chips of chopping residues in an acetic acid solution, the size of the working gap and the angle of inclination of the front edge of the knife on the grinding degree and fractional quality of wood pulp grinding was determined. Statistical and mathematical equations, that describe the studied process, were obtained, and the graphical dependencies are constructed. The following basic requirement is fulfilled for the dependencies: the experimental points for a total should lie quite close to the curve. These equations allow predicting the quality of wood pulp depending on the set modes of the grinding process; as well as determining the quality indicators of wood pulp with known values of the technological and structural parameters of the grinding machine. The efficiency of the process of obtaining the wood-fiber semi-finished product in an aerodynamic environment from wood chips produced as a result of chopping residues (branches, twigs, etc.) processing in a mobile wood chipper, is proven.

For citation: Zyryanov M.A., Medvedev S.O. Modeling the Production Processes of Wood-Fiber Semi-Finished Products Aimed at Expansion of the Raw Material Base of Forest Enterprises. *Lesnoy Zhurnal* [Russian Forestry Journal], 2020, no. 5, pp. 176–183. DOI: 10.37482/0536-1036-2020-5-176-183

Funding: The research was carried out with the support from the grant of the President of the Russian Federation for young scientists (candidates of sciences) MK-1902.2019.6; the project “Development and Implementation of an Effective Technology for Integrated Processing of Logging Waste” was supported by the Krasnoyarsk Regional Fund of support scientific and technical activities.

Keywords: fibrillation, grinding degree, chips, fiber, chopping residues, mathematical model, grinding.

Поступила 22.06.19 / Received on June 22, 2019
