

Научная статья

УДК 678.046.52

DOI: 10.37482/0536-1036-2024-4-159-176

Удельные энергетические затраты на измельчение древесины при подготовке композита для 3D-печати

Н.П. Мидуков¹✉, *д-р техн. наук*; ResearcherID: [H-2514-2019](https://orcid.org/0000-0002-6153-655X),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6153-655X>

Н.В. Евдокимов¹, *ст. преподаватель*; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8875-3493>

В.С. Куров¹, *д-р техн. наук, проф.*; ResearcherID: [V-7289-2017](https://orcid.org/0000-0002-7168-9613),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7168-9613>

В.В. Коршунов², *техн. директор*; ResearcherID: [JHT-5558-2023](https://orcid.org/0009-0008-5259-5196),

ORCID: <https://orcid.org/0009-0008-5259-5196>

¹Санкт-Петербургский государственный университет промышленных технологий и дизайна, ул. Ивана Черных, д. 4, Санкт-Петербург, Россия, 198095; mnp83@mail.ru✉, nikoev@rambler.ru, vskurov18@mail.ru

²ООО «ДробТехМаш», ул. Центральная, д. 57, оф. 337, г. Уфа, Россия, 450024; korshunof@bk.ru

Поступила в редакцию 13.10.23 / Одобрена после рецензирования 16.01.24 / Принята к печати 19.01.24

Аннотация. Северо-Западный федеральный округ – регион России, богатый разнообразными породами древесины. Свойства древесины этого региона существенно отличаются от свойств древесины, выращенной в других странах или в восточной части России, что приводит к различиям в энергетических затратах на измельчение древесины. Целью данного исследования является оценка удельных энергетических затрат на измельчение древесины до состояния древесной муки, которая будет использоваться в качестве основы для древесно-полимерных композиционных расходных материалов в аддитивных технологиях. Древесную муку получали путем измельчения древесины в лабораторной дисковой мельнице, многократно уменьшая размер частиц. Анализ гранулометрического состава проводили для древесины бука, дуба, лиственницы, ольхи и сосны при 1, 3, 5 и 10 циклах измельчения. Размеры частиц определяли путем анализа изображений, полученных с помощью оптического микроскопа и обработанных в графической программе ImageJ. Удельные энергетические затраты на измельчение оценивали путем ежесекундной регистрации мощности ваттметром при многократной подаче древесной муки для известной производительности мельницы. При расчете удельного энергопотребления учитывали влажность каждой породы древесины, а также потери производительности, связанные с налипанием частиц древесины на рабочие поверхности диспергирующей гарнитуры и внутренней области корпуса дисковой мельницы. В результате исследования выявлена связь между удельными энергетическими затратами и размером частиц древесной муки, полученной из различных пород древесины. Регрессионный анализ кривых, соответствующих различным породам древесины, позволил получить экспоненциальные и степенные зависимости, которые не противоречат основополагающим теоретическим закономерностям измельчения твердых частиц. На основании этих результатов мука из древесины сосны была признана наиболее энергоэффективным вариантом. Установленные зависимости можно использовать для прогнозирования удельных энергозатрат на измельчение древесины бука, дуба, лиственницы, ольхи и сосны на дисковых мельницах.

© Мидуков Н.П., Евдокимов Н.В., Куров В.С., Коршунов В.В., 2024

Статья опубликована в открытом доступе и распространяется на условиях лицензии CC BY 4.0

Ключевые слова: древесная мука, древесно-полимерный композит, размол древесины, удельные энергетические затраты, распределение частиц по размерам

Благодарности: Исследование проведено в рамках темы «Разработка методов оценки и анализ неоднородности межволоконных связей в 2D/3D гетерогенной среде целлюлозных композиционных материалах». Совместный научный и научно-технический проект, выполняемый образовательными и научными организациями, расположенными на территориях Санкт-Петербурга и Республики Беларусь, поддержан Комитетом по науке и высшей школе правительства Санкт-Петербурга. Авторы выражают благодарность центру коллективного пользования НИЦ «Курчатовский институт» – ЦНИИ КМ «Прометей» за поддержку при проведении экспериментальных исследований гранулометрического состава древесных частиц. Также благодарны за высококвалифицированные консультации по морфологии мелких частиц, образующихся после измельчения.

Для цитирования: Мидуков Н.П., Евдокимов Н.В., Куров В.С., Коршунов В.В. Удельные энергетические затраты на измельчение древесины при подготовке композита для 3D-печати // Изв. вузов. Лесн. журн. 2024. № 4. С. 159–176. <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2024-4-159-176>

Original article

Specific Energy Costs of Grinding Wood when Preparing a Composite for 3D-Printing

*Nikolay P. Midukov*¹, Doctor of Engineering; ResearcherID: [H-2514-2019](https://orcid.org/0000-0002-6153-655X),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6153-655X>

*Nikolay V. Evdokimov*¹, Senior Lecturer; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8875-3493>

*Victor S. Kurov*¹, Doctor of Engineering, Prof.; ResearcherID: [V-7289-2017](https://orcid.org/0000-0002-7168-9613),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7168-9613>

*Valerii V. Korshunov*², Technical Director; ResearcherID: [JHT-5558-2023](https://orcid.org/0009-0008-5259-5196),

ORCID: <https://orcid.org/0009-0008-5259-5196>

¹Saint-Petersburg State University of Industrial Technologies and Design, ul. Ivana Chernykh, 4, Saint Petersburg, 198095, Russian Federation; mnp83@mail.ru, nikoev@rambler.ru, vskurov18@mail.ru

²LLC “DrobTechMash”, ul. Tsentral'naya, 57, of. 337, Ufa, 450024, Russian Federation; korshunof@bk.ru

Received on October 13, 2023 / Approved after reviewing on January 16, 2024 / Accepted on January 19, 2024

Abstract. The Northwestern Federal District is a region of Russia rich in a variety of wood species. The properties of wood in this region differ significantly from the properties of wood grown in other countries or in the eastern part of Russia, which leads to differences in energy costs of grinding wood. The aim of this research has been to estimate the specific energy costs of grinding wood to the state of wood flour, which will be used as the basis for wood polymer composite consumables in additive technologies. Wood flour has been obtained by grinding wood in a laboratory disk mill, repeatedly reducing the particle size. The granulometric composition has been analyzed for beech, oak, larch, alder and pine wood at 1, 3, 5 and 10 grinding cycles. Particle sizes have been determined by analyzing images obtained using an optical microscope and processed in the ImageJ graphic program. The specific energy costs



of grinding have been estimated by recording the power with a wattmeter every second with repeated feeding of wood flour for the known mill productivity. When calculating the specific energy consumption, the moisture content of each wood species has been taken into account, as well as productivity losses associated with the adhesion of wood particles to the working surfaces of the dispersing set and the inner area of the disk mill body. The research has revealed a relationship between the specific energy costs and the particle size of wood flour obtained from various wood species. Regression analysis of curves corresponding to different wood species has made it possible to obtain exponential and power-law dependencies that do not contradict the fundamental theoretical laws of grinding solid particles. Based on these results, pine wood flour has been recognized as the most energy-efficient option. The established dependencies can be used to predict the specific energy consumption for grinding beech, oak, larch, alder and pine wood in disk mills.

Keywords: wood flour, wood-polymer composite, wood grinding, specific energy costs, particle size distribution

Acknowledgements: The research was carried out within the framework of the topic “Development of Methods for Evaluating and Analyzing the Heterogeneity of Interfiber Bonds in a 2D/3D Heterogeneous Medium of Cellulose Composite Materials.” A joint scientific and scientific-technical project carried out by educational and scientific organizations located in the territories of St. Petersburg and the Republic of Belarus was supported by the Committee for Science and Higher Education of the Government of St. Petersburg. The authors express their gratitude to the Center for Collective Use of the National Research Center “Kurchatov Institute” – the Central Research Institute of Structural Materials “Prometey” for support in conducting experimental investigations of the granulometric composition of wood particles. We are also grateful for highly qualified consultations on the morphology of small particles formed after grinding.

For citation: Midukov N.P., Evdokimov N.V., Kurov V.S., Korshunov V.V. Specific Energy Costs of Grinding Wood when Preparing a Composite for 3D-Printing. *Lesnoy Zhurnal = Russian Forestry Journal*, 2024, no. 4, pp. 159–176. (In Russ.). <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2024-4-159-176>

Введение

Древесина является природным материалом, в состав которого входят целлюлоза, гемицеллюлозы, лигнин, экстрактивные вещества. В зависимости от породы, возраста дерева, времени года и места произрастания компонентный состав может быть разным. Плотность, влажность и др. свойства древесины влияют на ее прочность и энергопотребление оборудования в процессе измельчения древесины.

Мелкие опилки и древесная пыль, помимо устоявшихся областей применения, таких как совместное сжигание с углем и производство биотоплива, могут быть использованы в древесно-пластиковых композитах, для получения которых измельчение древесины в порошок или тонкое измельчение древесины – важный этап предварительной обработки [2, 11, 15]. Из-за прочности древесной матрицы измельчение является энергоемким процессом, и для повышения экономичности может потребоваться предварительная термическая или химическая обработка [19].

Несмотря на то, что плотность материала клетки древесины любой породы равна 1530 кг/м³, каждый из них имеет уникальную структуру. Внутри одной породы могут наблюдаться изменения клеточной структуры (длины воло-

кон) в зависимости от условий произрастания дерева [5–7]. Таким образом, на энергетические затраты в процессе размолла влияют исходные размеры и форма частиц древесины, порода, место произрастания, влажность материала, а также используемое размалывающее оборудование.

Американские ученые представили результаты размолла древесины белого кедра, сосны, пихты и красного клена, растущих в Северной Америке [20, 21]. Показаны расчеты по снижению энергетических затрат на транспортировку древесины за счет измельчения и прессования. Одним из основных методов исследования древесной муки была сканирующая электронная микроскопия (СЭМ), позволившая выявить причины повышения насыпной плотности (с 190...220 до 700...750 кг/м³) – особенности микроструктуры частиц кедра, сосны, пихты, клена (ширина частиц, жесткость, количество мелких, поломанных частиц, слоистость, схожесть с трубчатой структурой, наличие пучков волокон и т. д.).

СЭМ или оптическую микроскопию часто используют для оценки формы частиц древесной муки. Эти методы в большей степени объясняют влияние формы частиц на насыпную плотность, свойства композита на основе частиц древесины [10, 18]. Оптическая микроскопия древесной муки с применением графических программ, как правило, выступает в качестве доступного метода, в отличие от дорогой СЭМ. Однако с помощью последней, обладающей большим разрешением, можно детальнее оценить геометрию частиц. Работы по исследованию древесной муки чаще всего посвящены конкретным породам древесины [8, 12, 23].

В большинстве случаев удельные энергозатраты на размол древесины находятся в экспоненциальной зависимости от размера получаемых частиц. Измельчение твердых частиц древесины в молотковых дробилках можно описать законом Риттингена [14, 25]. По такому же закону действуют измельчители строительных смесей [14]. В работе [14] предложена мельница, которая эффективно работала только до определенной степени помола древесины. Тенденция снижения эффективности измельчения характерна для большинства размалывающих машин. Однако конструкция мельницы во многом определяет успешность процесса на разных стадиях, которых может быть несколько.

В статье [25] представлены результаты оценки удельных затрат энергии на размол древесины сосны и пихты, растущих в Северной Америке, при 2-стадийном измельчении: сначала в мельнице ударного типа до размеров частиц 316...1618 мкм, а затем в молотковой дробилке до размеров 35...250 мкм. Авторы установили, что затраты энергии резко возрастают при размолле до мелкой фракции. Несмотря на типичный экспоненциальный характер изменения энергии при измельчении древесины, количественный показатель в большей степени будет определяться размалывающим оборудованием.

Известны способы размолла древесины в ножевых, дисковых, вибрационных, истирающих и сдавливающих аппаратах. Ножевые размалывающие машины нашли широкое применение при измельчении древесины до крупных частиц, например при производстве щепы либо при измельчении веток, стружек, реек. В таких аппаратах осуществляется грубое предварительное

измельчение. Для производства древесной муки распространены мельницы ударного типа [25].

Дисковые мельницы часто применяют при мокром размоле древесины, т. к. при сухом за счет сил трения большое количество энергии переходит в тепловую, что приводит к возгоранию частиц древесины. Однако этот способ размола показал очень высокую эффективность.

Теория процесса размола целлюлозных материалов в дисковых мельницах была создана А.А. Гаузе, В.Н. Гончаровым. В их работе подробно оценен каждый из факторов (механическое, ударное, пульсационное, кавитационное воздействия, воздействия жидкостного трения), определяющих в целом энергетическую составляющую процесса размола. Представлены подробные методики расчета размалывающих машин для различных видов волокнистых суспензий [3]. В работах Ю.Д. Алашкевича с соавт. мокрый размол показан как способ измельчения древесины с последующим удалением части лигнина [1, 16].

Измельчители типа роллов встречаются как при мокром, так и при сухом способах размола древесины (щепы и опилок). Наиболее мелкая фракция частиц древесины может быть получена в шаровых мельницах, которые подразделяются на вращающиеся с перемешиванием и вибрационные [23]. Однако самой распространенной мельницей для получения древесной муки в больших объемах является молотковая дробилка.

Таким образом, можно отметить, что исследований в области влияния удельных энергетических затрат при размоле на размеры частиц древесины, а также данных о диапазоне размеров частиц, при котором затраты энергии резко повышаются с небольшим уменьшением размеров частиц древесины Северо-Западного региона нашей страны, нет, что стало целью данной работы. Для достижения цели необходимо решить задачи, связанные с подготовкой для отечественных предприятий доступной и недорогой методики оценки размеров частиц при размоле, затрат мощности при размоле различных пород древесины, определения зависимостей удельных затрат энергии от размеров частиц древесины.

Важно также отметить, что размеры частиц древесины оказывают влияние на свойства полимерных композитов на основе древесной муки [4, 9, 13, 17, 22]. Значимость подготовки древесины в небольших объемах для аддитивных технологий заключается в соотношении энергетических затрат на измельчение с другими затратами, такими как транспортные и трудовые.

Объекты и методы исследования

В ходе исследования измельчали древесину бука, дуба, лиственницы, ольхи и сосны, взятых в Северо-Западном регионе России в осеннее время. Контроль влажности осуществляли с помощью термогравиметрического инфракрасного влагомера Sartorius M-45 (Германия). Равновесная влажность (древесина более 2 недель находилась в закрытой лаборатории при температуре 20 °С и относительной влажности 75...80 %) бука составила 5,8 %; дуба – 5,8 %; лиственницы – 10,0 %; ольхи – 6,7 %; сосны – 8,9 %. Размол древесины выполняли в лабораторной дисковой мельнице Stromberg HXUR 225A3

(Швеция) при одинаковом режиме работы для всех видов древесины. Характеристики мельницы: мощность – 2,2 кВт; частота вращения – 940 об./мин; номинальный ток – 5,5 А; отношение входного тока к номинальному – 4,8; отношение пускового крутящего момента к номинальному – 2,4; отношение максимального крутящего момента к номинальному – 2,4; коэффициент мощности двигателя – 0,76; коэффициент полезного действия – 80 %; момент инерции ротора – 0,0085 кг·м². Частицы древесины измельчали в режиме работы мельницы с минимальным зазором [24].

Предварительно были определены энергозатраты лабораторной мельницы, через которую многократно пропускали по 50 г частиц древесины. Мельница функционировала при минимально возможном зазоре между дисками ротора и статора.

Оценку мощности при размоле древесины различных пород (бука, дуба, лиственницы, ольхи и сосны) производили с помощью ваттметра Watt meter АСМ-8003, который был подсоединен к 3-фазному электродвигателю переменного тока (380 Вт) – приводу лабораторной дисковой мельницы.

После размола оценивали распределение частиц по размерам с помощью оптической микроскопии и программы ImageJ. Для получения изображения древесную муку распределяли на предметном стекле оптического микроскопа. Четыре смежных микроснимка объединяли, при этом позиционирование осуществляли по тарировочной окружности диаметром 0,15 мм (на рис. 1 отмечена темным кружком).

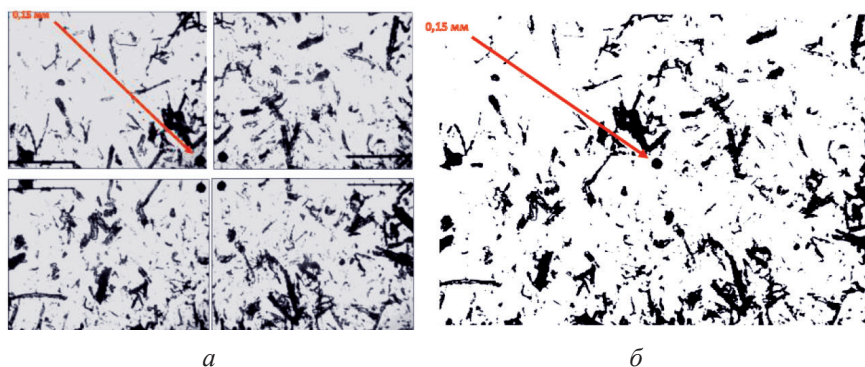


Рис. 1. Микроснимки частиц древесины: *a* – отдельных участков; *б* – объединенный

Fig. 1. The micrographs of wood particles: *a* – individual sections; *б* – combined micrograph

Более широкий охват области, состоящей из 4 снимков, позволил проанализировать больше частиц, тем самым повысив точность измерения.

Изображение, показанное на рис. 1, *б*, для ускорения дальнейшей обработки было преобразовано в программе ImageJ в 8-битный формат с помощью набора команд Image → Type → 8-bit (Изображение → Тип → 8 бит) (рис. 2, *a*). Затем был установлен масштаб путем нанесения размерной линии длиной 0,15 мм (рис. 2, *б*). После установки масштаба программа точно позволяет рассчитать геометрию черных областей на изображении, соответствующих частицам древесной муки.

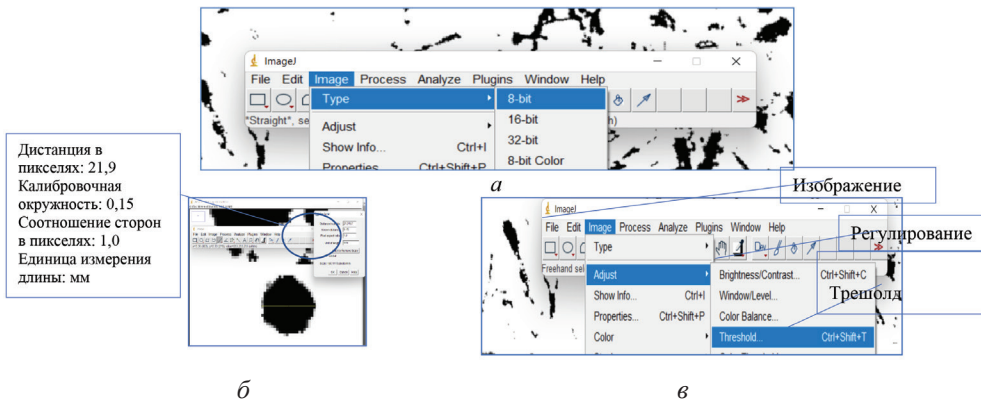


Рис. 2. Загрузка и первичная обработка изображения микроснимков в ImageJ: *a* – перевод изображения в 8-битный формат; *б* – установка масштаба относительно калибровочной окружности диаметром 0,15 мм; *в* – автоматическая графическая обработка изображения

Fig. 2. The loading and primary processing of micrograph images in ImageJ: *a* – converting an image into an 8-bit format; *б* – setting the scale relative to the calibration circle with a diameter of 0.15 mm; *в* – automatic graphic image processing

Следующим этапом подготовки микроснимков (рис. 3, *a*) является автоматическая обработка с помощью команд Image → Adjust → Threshold (Изображение → Регулирование → Трешолд).

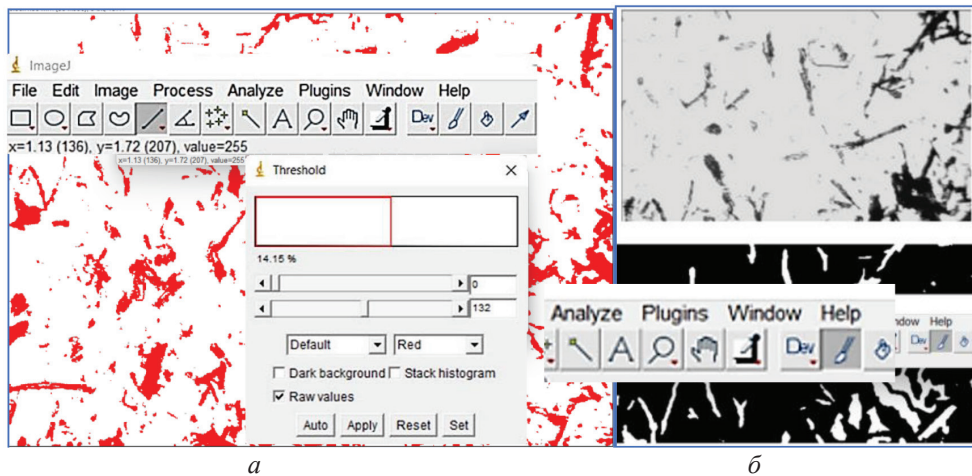


Рис. 3. Подготовка микроснимков к анализу: *a* – результат автоматической обработки командой Threshold; *б* – использование графических фильтров

Fig. 3. Preparing micrographs for analysis: *a* – result of automatic processing with the “Threshold” command; *б* – using graphic filters

В некоторых случаях необходимо графическое фильтрование объектов (рис. 3, *б*). Важно отметить, что частицы древесины являются 3-мерными и фокусировка микроскопа может исказить их размеры. Проверка геометрии частиц древесины включает небольшую корректировку фокуса и ручное уточнение графического изображения (рис. 3, *б*). Программа ImageJ предоставляет

необходимые инструменты для этой цели. Графический фильтр использовали в одинаковом режиме для обработки каждого изображения.

После предварительной подготовки образцы были выделены (рис. 4, *a*) посредством команды Edit → Selection → Create Selection (Корректировка → Выборка → Создать выборку).

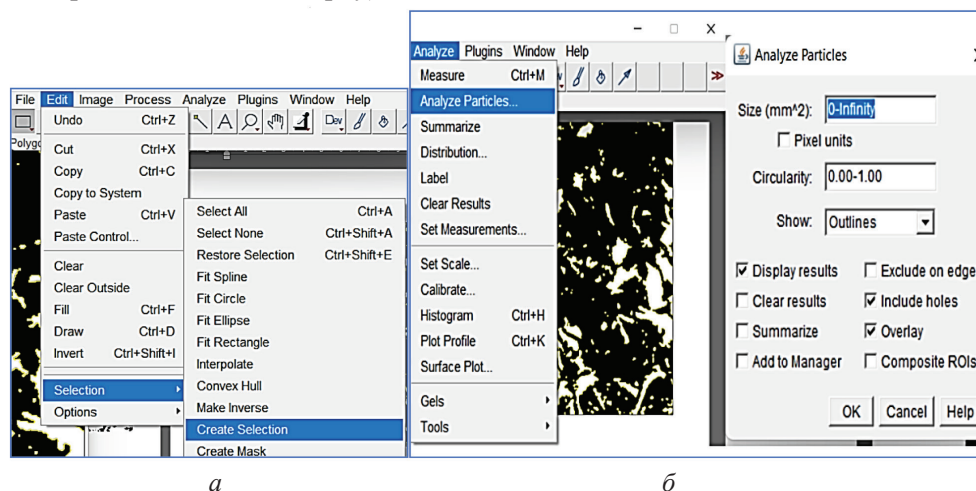


Рис. 4. Выделение областей, соответствующих частицам древесины (*a*), и дальнейший анализ частиц (*б*)

Fig. 4. The identification of areas corresponding to wood particles (*a*) and further particle analysis (*б*)

Затем производили расчет геометрических параметров частиц, выделенных с помощью последовательности команд Analyze → Analyze Particles (Анализ → Анализ частиц). В открывшемся диалоговом окне (рис. 4, *б*) можно выбрать диапазон размеров частиц, которые следует учитывать. В данном случае выделены все частицы (рис. 5).

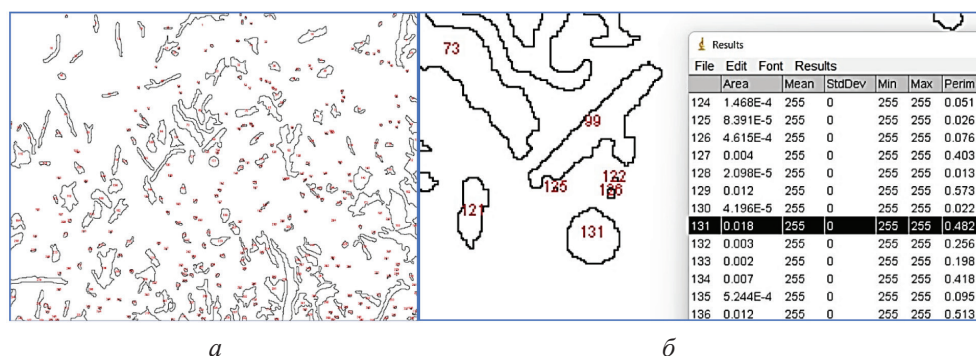


Рис. 5. Выделение и нумерация исследуемых областей в программе ImageJ: выделенные объекты (*a*) и данные их расчета (*б*)

Fig. 5. The selection and numbering of the study areas in the ImageJ program: selected objects (*a*) and their calculation data (*б*)

Программа ImageJ позволяет рассчитать размеры частиц. Например, на рис. 5, *б* отображены результаты определения площади (Area) и периметра (Perim). Всего программа зафиксировала и проанализировала 358 объектов.

Достоверность расчета размеров можно проверить по 131-му объекту, который соответствует калибровочной окружности диаметром 0,15 мм, площадь каждого объекта определима по формуле $S = \pi d^2/4 = 0,018 \text{ мм}^2$ (d – диаметр, мм), что совпадает с рассчитанным программой ImageJ.

Следующим этапом является статистическая обработка данных, а именно построение диаграммы распределения частиц по размерам. Программа ImageJ не имеет функции построения графиков распределения, но может передать данные расчета площади и периметра в Excel. Для этого был установлен специальный плагин Excel Writer. После установки получен доступ к команде Excel ToolBar в программном меню ImageJ.

Как правило, современные анализаторы частиц в качестве результата показывают не площадь и не периметр, а размер частицы, который представляет собой эквивалентный диаметр. Это понятие широко используется при теоретическом описании и расчете процессов, в которых частицы не имеют шарообразную форму. Распределение частиц по размерам строится по данным их эквивалентного диаметра, рассчитанным в Excel.

Таким образом, с помощью ImageJ определены размеры частиц древесины после размола в мельнице, для чего использована оптическая микроскопия. Всего было проанализировано 7158 частиц, разделенных на классы по природе древесины: бук (Б), дуб (Д), лиственница (Л), ольха (О), сосна (С); и подклассы по числу циклов размола: 0 – без размола; 1, 3, 5, 10 циклов размола в дисковой мельнице. На рис. 6 представлены отдельные области (15×15 мм), малая часть от всего анализируемого изображения. В среднем площадь анализируемой области составляла 50×50 мм.

Результаты исследования и их обсуждение

Визуальный анализ рис. 6 показывает, что с увеличением числа проходов через мельницу размеры частиц уменьшаются в разной степени для различных видов древесины. Причем после 1 цикла размола происходит максимальное снижение размеров частиц. Кроме того, видно, что после размола появляется большое количество частиц с явными признаками изломов, трещин, каверн. Однако для более детального исследования необходимо проанализировать размеры каждой частицы, после чего получить кривые их дифференциального распределения по размерам. С помощью этих кривых можно оценить качество размола на каждой стадии.

Существует рекомендация по выбору параметра дифференциальной кривой распределения, по которой ведется сравнение. До известной степени выбор наилучшей меры центральной тенденции зависит от шкалы измерений: если есть данные, извлеченные из номинальной шкалы, то единственно подходящей может быть мода, т. е. пик (вершина кривой) размеров частиц. Если данные взяты из ранговой (порядковой) шкалы, то искомыми мерами будут и мода, и медиана. Когда данные метрические, интервальные или измерены по абсолютной шкале, то применимы все 3 меры. Обычно при анализе метрических данных на практике используют более 1 меры центральной тенденции. Чаще всего это среднее и медиана [24]. В данном случае в качестве оценки и сравнения кривых распределения частиц по размеру была использована медиана дифференциальной кривой.

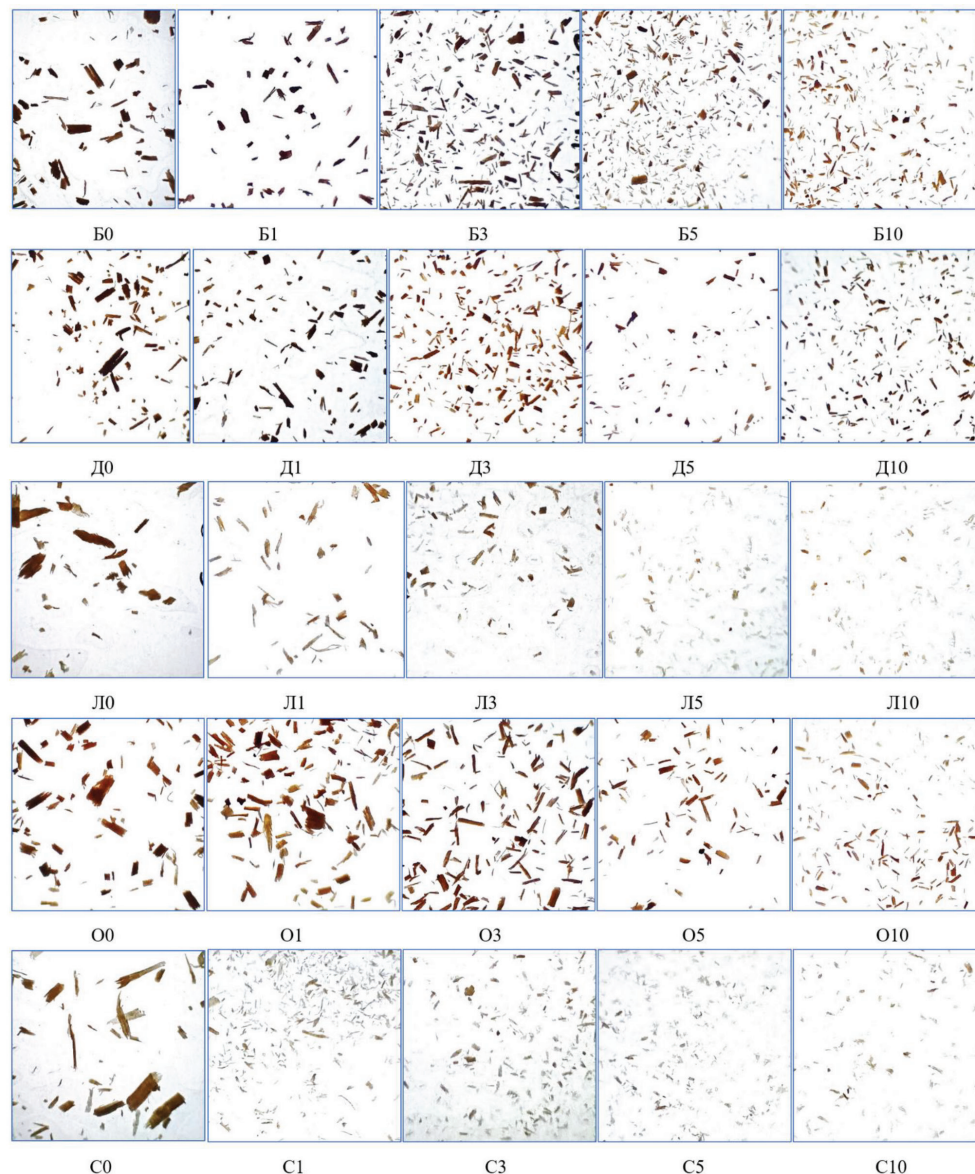


Рис. 6. Фрагменты изображений частиц древесины бука, дуба, лиственницы, ольхи и сосны, полученные оптическим микроскопом и цифровой камерой после 0, 1, 3, 5, 10 проходов древесины через мельницу

Fig. 6. The fragments of images of beech, oak, larch, alder and pine wood particles obtained with an optical microscope and a digital camera after 0, 1, 3, 5 and 10 passes of wood through the mill

Интервал распределения частиц, как правило, оценивают по формуле Г.А. Стерджеса [24], по ней интервал составил 300 мкм. В нашем случае необходимыми и максимально возможными являются интервалы в 100 мкм. На рис. 7 представлены кривые распределения частиц по размерам для разных пород древесины. Кривые дифференциального распределения были сгруппированы по породам древесины. Каждый график включает в себя 5 дифференциальных кривых, которые соответствуют числу циклов размолта древесины в дисковой мельнице.

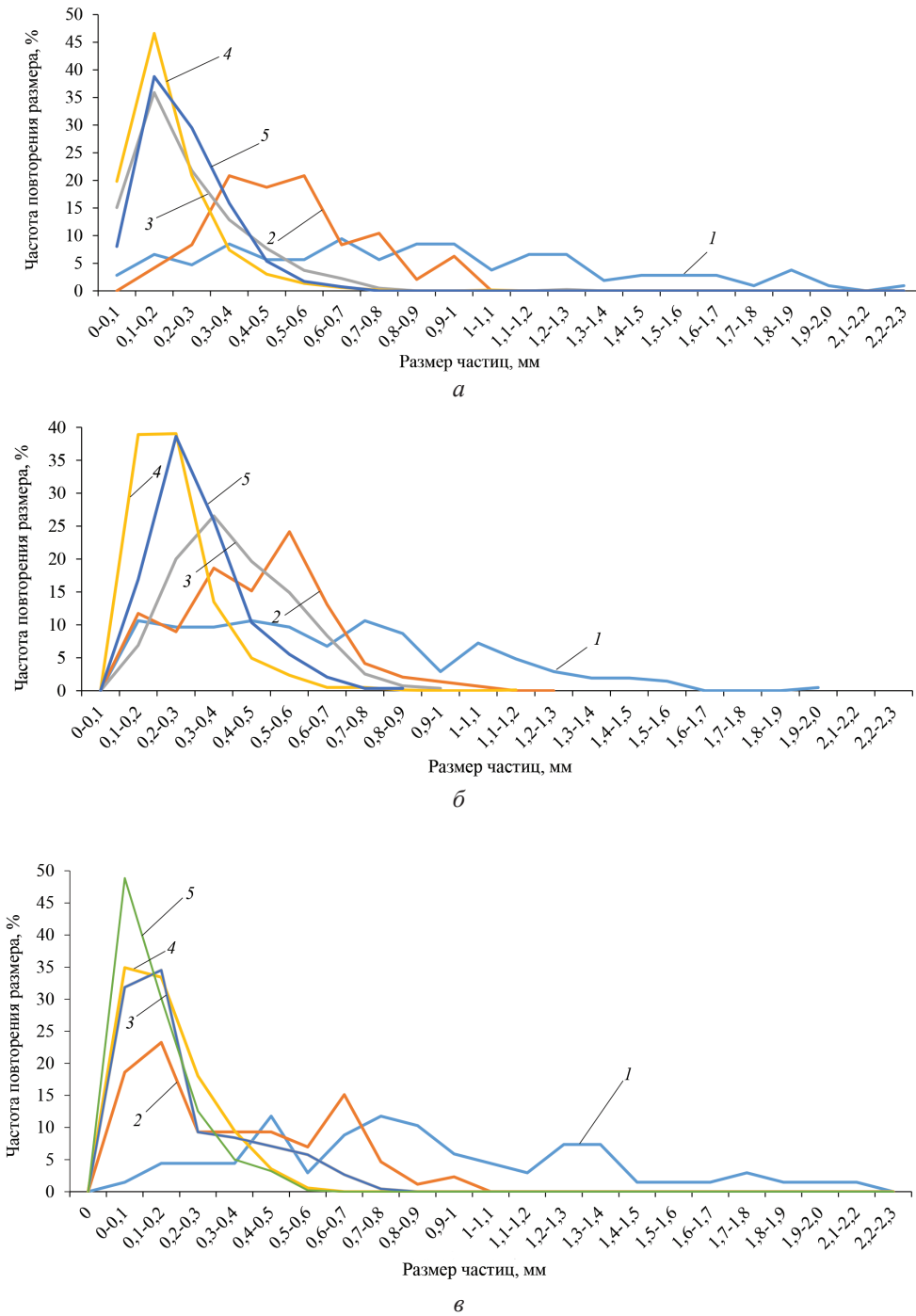


Рис. 7. Влияние продолжительности размола в лабораторной дисковой мельнице на размеры частиц: а, б, в – древесина бука, дуба, лиственницы соответственно; 1, 2, 3, 4, 5 – кривые распределения после 0, 1, 3, 5, 10 проходов через мельницу соответственно

Fig. 7. The effect of grinding duration in a laboratory disk mill on particle sizes: а, б, в – beech, oak and larch wood, respectively; 1, 2, 3, 4, 5 – distribution curves after 0, 1, 3, 5, 10 passes through the mill, respectively

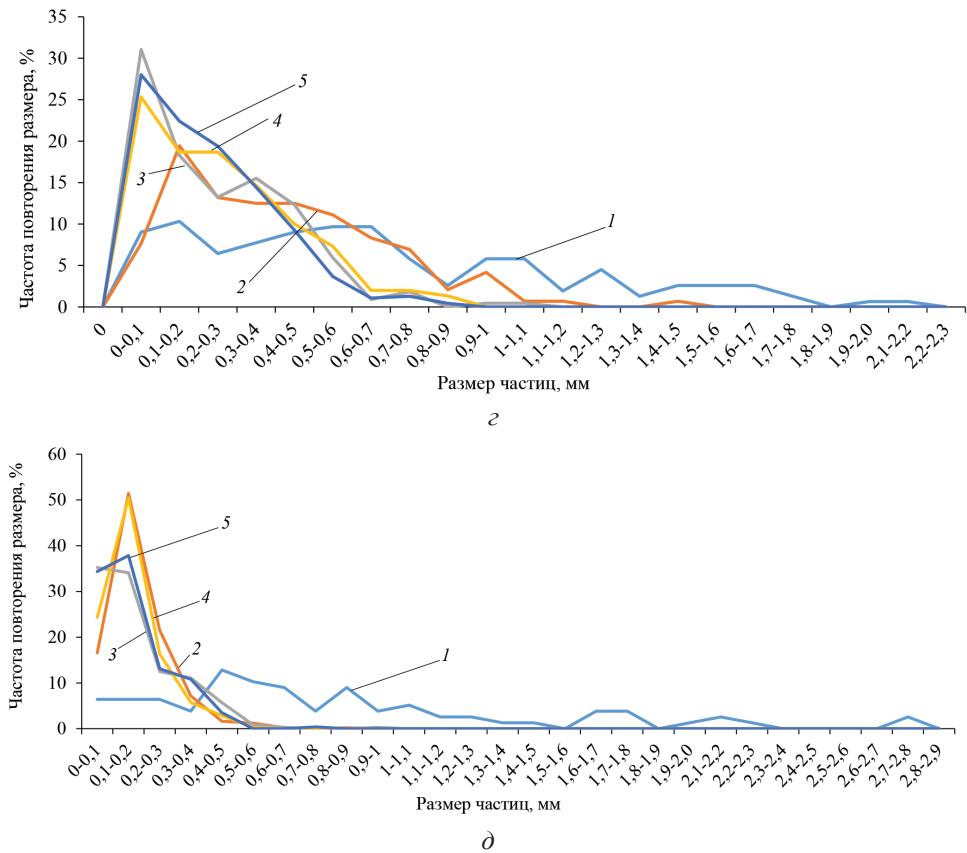


Рис. 7. Влияние продолжительности размола в лабораторной дисковой мельнице на размеры частиц (окончание): *а, б* – древесина ольхи и сосны соответственно; *1, 2, 3, 4, 5* – кривые распределения после 0, 1, 3, 5, 10 проходов через мельницу соответственно

Fig. 7. The effect of grinding duration in a laboratory disk mill on particle sizes: *а, б* – alder and pine wood, respectively; *1, 2, 3, 4, 5* – distribution curves after 0, 1, 3, 5, 10 passes through the mill, respectively

На рис. 7, *а* представлены дифференциальные кривые распределения частиц древесины бука. Кривая *1* соответствует нормальному распределению частиц древесины до размола, среднее значение при этом находится на уровне 851 мкм, наибольший пик соответствует 780 мкм, а медиана составляет 800 мкм. Всего было исследовано 106 частиц. После 1 размола произошло снижение среднего значения и медианы (493 мкм). Характер распределения остался нормальным, но наблюдалась асимметрия влево. Об этом свидетельствует большее значение моды (в пике распределения), чем медианы. Дальнейший размол древесины бука также приводил к снижению размеров частиц. После 10-го прогона, в котором была исследована 661 частица, медиана была на уровне 161 мкм, а пик пришелся на 126 мкм. Следует отметить, что при анализе влияния циклов размола на размер частиц установлено резкое снижение медианы после 1-го размола, а в последующем размол с каждым циклом незначительно уменьшал размеры частиц.

На рис. 7, *б* представлена группа дифференциальных кривых размеров частиц древесины дуба. По аналогии с буком, с каждым циклом размола древесины снижались размеры частиц. Предварительно перед размолом было ис-

следовано 207 частиц. Средний размер частиц (по медиане дифференциальной кривой) до размола находился на уровне 505 мкм, а характер дифференциальной кривой был нормальный. С дальнейшим увеличением числа циклов размола также наблюдалось снижение размеров частиц, и после 10 циклов медиана распределения составила 127 мкм, при этом мода, маркирующая пик распределения, была ниже, что говорит об асимметрии дифференциальной кривой влево. Количество проанализированных частиц с увеличением числа циклов размола повышалось до 808. В целом можно отметить аналогию в изменении частиц в зависимости от числа циклов размола древесины бука. Как известно, древесина бука и дуба обладает примерно одинаковой плотностью; вероятно, поэтому особенности их размола схожи, о чем свидетельствует совпадающая динамика изменения частиц, представленная в виде дифференциальных кривых распределения.

Древесина лиственницы существенно отличается от бука и дуба плотностью, которая составляет примерно 370 кг/м³. В результате характер распределения частиц по размерам после каждого цикла размола другой по сравнению с характером распределения частиц древесины бука и дуба. Каждая кривая цикла размола была умеренно асимметричной и не подчинялась нормальному закону. Кроме того, дифференциальные кривые после 1-го цикла размола и без размола имели ярко выраженную бимодальную составляющую, обладая 2 пиками. Сравнение дифференциальных кривых также проводили по медиане, которая в начальном варианте находилась на уровне 781 мкм, а после 10-го цикла – на уровне 106 мкм. После 3-го цикла медиана составила 135 мкм, что соответствует размеру частиц древесины, подходящему для составления композиций. Во всех 3 случаях, соответствующих распределению частиц после 3, 5, 10 циклов размола, мода была ниже медианы, что говорит об асимметрии дифференциальной кривой распределения влево. В отличие от дуба и бука лиственница размалывалась гораздо быстрее, следовательно, можно утверждать о меньших затратах энергии на ее размол по сравнению с дубом и буком.

На рис. 7, з показаны кривые распределения частиц древесины ольхи по размерам. Размер частиц, согласно медиане, составил 547 мкм. Перед размолем было проанализировано 155 частиц. Их первоначальное распределение в интервале 100 мкм представлено в виде кривой, отличной от нормального распределения. По аналогии с буком и дубом у ольхи плавно снижалось среднее значение (по медиане) размера частиц с каждым циклом размола. В итоге после 10-го цикла был получен размер частиц 199 мкм, соответствующий медиане кривой 5 на рис. 7, з. По аналогии с лиственницей, ни одна из кривых для ольхи не попадала под закон нормального распределения, за исключением кривой после 1-го цикла размола. Остальные кривые либо не соответствовали нормали, либо имели умеренно асимметричный характер распределения. В целом можно сказать, что параметры древесины ольхи при размолке занимают промежуточное положение между параметрами для бука и дуба или лиственницы.

Характер распределения частиц древесины сосны (рис. 7, д) заметно отличался от распределения частиц других видов древесины. На 1-м этапе было исследовано 78 частиц, при этом распределение кривой не соответствовало нормальному и медиана находилась в пределах 600 мкм, а пик повторяемости размеров составил 115 мкм. Среднее арифметическое было 810 мкм. Такой

разброс в параметрах распределения частиц означает, что сосна имеет довольно хрупкую структуру и быстро разрушается. Уже после 1-го цикла размолы медиана снизилась до 146 мкм – вывод сделан на основе исследования 488 частиц, – а мода сохранилась на прежнем уровне – 112 мкм. Дальнейший размол (до 10-го цикла) практически не дал результатов – медиана, мода и среднее значение остались почти на том же уровне. Характер распределения частиц был умеренно асимметричным во всех случаях. Вероятно, дальнейшая обработка в мельнице подобного типа была нецелесообразна, т. к. размер частиц древесины изменился незначительно. Однако цель размолы заключалась в получении частиц древесины менее 200 мкм, что было достигнуто уже после 1-го цикла размолы, поэтому сосна является наиболее предпочтительным видом древесины с точки зрения затрат энергии на размол.

Представленные графики распределения частиц по размерам позволяют характеризовать особенность размолы древесины различных пород. Однако при размолы древесины необходимо оперировать удельными затратами энергии. Эффективность размолы определяется зависимостью между удельными затратами энергии и размерами частиц древесины. Сравнив их между собой, можно прийти к окончательному выводу о целесообразности использования древесины сосны в качестве сырья для получения композита. Для этого были проведены экспериментальные исследования, которые зафиксировали показания мощности электродвигателя с помощью ваттметра. Размол древесины осуществляли подачей частиц в дисковую мельницу порциями по 25 г с многократным повторением. Всего было выполнено более 150 замеров мощности, по которым определяли энергетические затраты для каждого вида древесины (рис. 8).

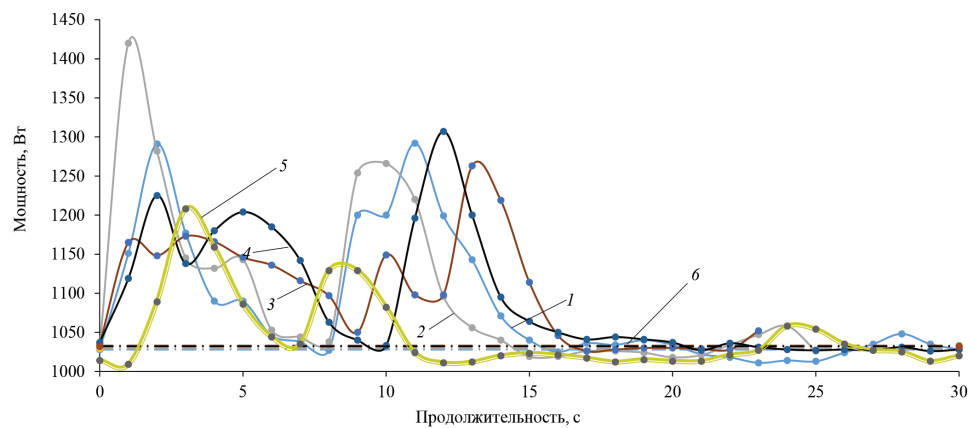


Рис. 8. Оценка мощности дисковой мельницы при размолы различных пород древесины: 1, 2, 3, 4, 5 – размол бука, дуба, лиственницы, ольхи и сосны соответственно; 6 – холостой ход

Fig. 8. The evaluation of the power of a disk mill when grinding various types of wood: 1, 2, 3, 4, 5 – grinding beech, oak, larch, alder and pine wood, respectively; 6 – idle

Из рис. 8 видно, что наибольшая мощность требуется для размолы древесины дуба и бука (1400 Вт); наименьшая – сосны (пик мощности – 1208 Вт). Мощность холостого хода при этом составила 1030 Вт. При расчете удельных затрат энергии было взято среднее значение 2 пиков мощности, соответствующих продолжительности размолы 15 с каждый (рис. 7).

Также для оценки удельных энергетических затрат была определена производительность мельницы, которая рассчитана исходя из массы размолотой древесины в единицу времени. Согласно расчетам, производительность мельницы составила приблизительно 9 кг/ч. После этого определяли удельные затраты энергии для исследуемых пород древесины. Общие удельные затраты энергии умножали на число циклов. В результате построены экспериментальные зависимости удельных затрат энергии от размеров частиц, определенных ранее по кривым распределения (за размер взята медиана распределения).

Из рис. 9 видно, что сосна после 1-го цикла, который соответствует удельным затратам энергии 0,118 кВт·ч/кг, размалывается до размеров частиц 131 мкм. Дальнейшее уменьшение размеров частиц до 120 мкм связано с 10-кратным увеличением удельных затрат энергии. Таким образом, древесина сосны может быть размолота за 1 цикл работы мельницы при удельных затратах энергии 0,118 кВт·ч/кг; для лиственницы размол до 135 мкм приходится на уровень энергетических затрат 0,378 кВт·ч/кг. Остальные виды древесины размалываются до необходимого диапазона (до 200 мкм) при расходе энергии 1,26 кВт·ч/кг, что соответствует 10 циклам размолы в дисковой мельнице. Таким образом, график показывает, что наиболее предпочтительной является древесина сосны, т. к. для ее размолы требуется гораздо меньше энергии, чем для остальных пород древесины.

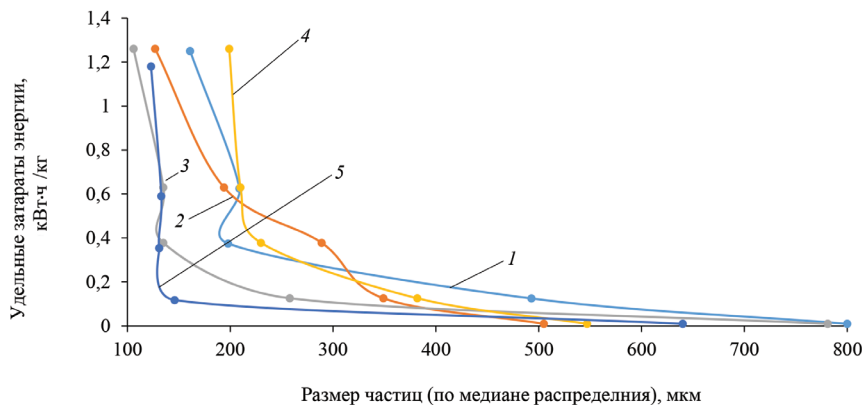


Рис. 9. Зависимость удельных затрат энергии на размол различных пород древесины от размеров частиц: 1 – бук; 2 – дуб; 3 – лиственница; 4 – ольха; 5 – сосна

Fig. 9. The dependence of the specific energy consumption for grinding various types of wood on the particle size: 1 – beech; 2 – oak; 3 – larch; 4 – alder; 5 – pine

Регрессионный анализ зависимостей удельных затрат энергии (E , кВт·ч/кг) от размеров частиц древесины (δ , мкм), представленных на рис. 9, дает возможность определить, к какому виду относится уравнение. Коэффициенты в уравнениях определены для конкретного случая лабораторного размолы в дисковой мельнице для частиц древесины, влажность которых находится в равновесии в определенном помещении. Однако представленные ниже уравнения для различных древесных пород при размолы были отнесены к следующим видам зависимостей:

для древесины бука $E = (69 \cdot 10^4)^{\delta-2,6}$ – наиболее близка степенная функция;

для дуба $E = e^{2,13-0,01\delta}$ – экспоненциальная зависимость;

для лиственницы $E = (47 \cdot 10^3)^{\delta-2,3}$ и ольхи $E = (35,9 \cdot 10^8)^{\delta-4,2}$ – степенная зависимость.

В отличие от бука, дуба, лиственницы и ольхи, уравнение для сосны пришлось разбить на диапазоны до 150 мкм и выше. В диапазоне до 150 мкм была предложена экспоненциальная зависимость, которая подчиняется уравнению

$$E = e^{12,1-0,1\delta}.$$

В диапазоне выше 150 мкм зависимость удельных затрат энергии от размеров частиц сосны при размоле соответствовала степенной зависимости, которая определяется уравнением

$$E = 236\delta^{-1,5}.$$

Индексы корреляции и детерминации были близки к 1 для всех представленных зависимостей, также были установлены фактические критерии Фишера, которые существенно превышали табличные, поэтому предложенные зависимости можно считать надежными для конкретных условий проведения размол в лабораторной дисковой мельнице.

Заключение

Оценены энергетические затраты на размол древесины различных пород с учетом требуемого размера частиц в диапазоне до 200 мкм для последующего создания расходного композита для 3D-печати. Получены зависимости удельных затрат энергии от размеров частиц древесины различных пород. Оценены энергозатраты на размол пород древесины, произрастающих в Северо-Западном регионе нашей страны. Было установлено, что сосна является наиболее предпочтительной с точки зрения удельных затрат энергии на размол и позволяет при минимальном расходе энергии получить необходимый фракционный состав при создании композита с его последующим послойным нанесением с целью изготовления деталей сложной формы с помощью 3D-печати. Для условий подготовки древесины в сравнительно небольших объемах, соответствующих потребностям аддитивных технологий на сегодняшний день, доля энергозатрат на размол от общих расходов с учетом рыночной цены древесины, транспортных расходов, трудозатрат и т. д. может быть существенна, чем вызван интерес производителей и поставщиков мельниц к изысканиям ученых в данной области.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Алашкевич Ю.Д., Юртаева Л.В., Решетова Н.С., Марченко Р.А. Влияние ножевого способа размол волокнистой массы на процесс получения порошковой целлюлозы // Химия растит. сырья. 2020. № 4. С. 493–499.

Alashkevich Yu.D., Yurtaeva L.V., Reshetova N.S., Marchenko R.A. The Influence of the Knife Method of Grinding Pulp on the Process of Obtaining Powdered Cellulose. *Khimiya Rastitel'nogo Syr'ya*, 2020, no. 4, pp. 493–499. (In Russ.). <https://doi.org/10.14258/jcprm.2020048121>

2. Борисов Н.А. Производство древесной муки тонкого помола. М., 1964. 21 с. Borisov N.A. *Production of Finely Ground Wood Flour*. Moscow, 1964. 21 p. (In Russ.).

3. Гаузе А.А., Гончаров В.Н. Основы теории и расчета оборудования для подготовки бумажной массы. СПб., 2017. Ч. I. 84 с.

Gauze A.A., Goncharov V.N. *Fundamentals of Theory and Calculation of Equipment for Preparing Paper Pulp*. St. Petersburg, 2017, part 1. 84 p. (In Russ.).

4. Клесов А.А. Древесно-полимерные композиты. СПб.: Науч. основы и технологии, 2010. 735 с.

Klesov A.A. *Wood-Polymer Composites*. St. Petersburg, Nauchnye osnovy i tekhnologii Publ., 2010. 735 p. (In Russ.).

5. Леонович А.А. Физико-химические основы образования древесных плит. СПб.: Химиздат, 2003. 192 с.

Leonovich A.A. *Physico-Chemical Basis for the Formation of Wood Boards*. St. Petersburg, Khimizdat Publ., 2003. 192 p. (In Russ.).

6. Леонович А.А. Технология древесных плит: прогрессивные решения. СПб.: Химиздат, 2005. 206 с.

Leonovich A.A. *Wood-Based Panel Technology: Progressive Solutions*. St. Petersburg, Khimizdat Publ., 2005. 206 p. (In Russ.).

7. Леонович А.А. Новые древесноплитные материалы. СПб.: Химиздат, 2008. 158 с.

Leonovich A.A. *New Wood-Based Materials*. St. Petersburg, Khimizdat Publ., 2008. 158 p. (In Russ.).

8. Липилин А.Б., Векслер М.В., Коренюгина Н.В., Морозов А.М., Кононов Г.Н., Косарев К.Л., Кудряшов А.В. Тонкий помол и сушка древесного сырья в вихревой мельнице-нагревателе // Вестн. МГУЛ – Лесн. вестн. 2013. № 3. С. 139–144.

Lipilin A.B., Vexler M.V., Korenyugina N.V., Morozov A.M., Kononov G.N., Kosarev K.L., Kudryashov A.V. Thin Grinding and Drying of Timber in Vortex Mill-Heater. *Lesnoy Vestnik = Forestry Bulletin*, 2013, no. 3, pp. 139–144. (In Russ.).

9. Мидуков Н.П., Куров В.С., Евдокимов Н.В. Биорефайнинг древесноволокнистого сырья в композиции материала для аддитивных технологий // Хим. волокна. 2023. № 1. С. 66–72.

Midukov N.P., Kurov V.S., Evdokimov N.V. Biorefining of Wood-Fibre Raw Material in a Material Composition for Additive Technologies. *Khimicheskie volokna = Fibre Chemistry*, 2023, vol. 55, no. 1, pp. 53–58. (In Russ.). <https://doi.org/10.1007/s10692-023-10426-6>

10. Морозов А.М., Кононов Г.Н., Косарев К.Л., Кудряшов А.В. Использование сканирующей электронной микроскопии для изучения нанопористой структуры продуктов переработки древесины // Вестн. МГУЛ – Лесн. вестн. 2013. № 2. С. 72–76.

Morozov A.M., Kononov G.N., Kosarev K.L., Kudryashov A.V. Using of Scanning Electron Microscopy to Studying Nanoporous Structure Products of Timber Processing. *Lesnoy Vestnik = Forestry Bulletin*, 2013, no. 2, pp. 72–76. (In Russ.).

11. Патент 2318655 РФ, МПК В27L11/06, А23К1/12. Способ получения древесной муки: № 2006123183/12: заявл. 29.06.2006: опубл. 10.03.2008 / А.А. Политов, О.В. Бершак, О.И. Ломовский.

Politov A.A., Bershak O.V., Lomovskij O.I. *Method for Production of Wood Flour*. Patent RF, no. RU 2318655 C1, 2008. (In Russ.).

12. Сиденко П.М. Измельчение в химической промышленности. 2-е изд., перераб. М.: Химия, 1977. 368 с.

Sidenko P.M. *Grinding in the Chemical Industry*: 2nd ed., revised. Moscow, Khimiya Publ., 1977. 368 p. (In Russ.).

13. Спиглазов А.В., Ставров В.П. Влияние размеров древесных частиц и степени наполнения на текучесть композиций с полипропиленом // Пласт. массы. 2004. № 12. С. 50–52.

Spiglazov A.V., Stavrov V.P. The Influence of the Size of Wood Particles and the Degree of Filling on the Fluidity of Compositions with Polypropylene. *Plasticheskie massy*, 2004, no. 12, pp. 50–52. (In Russ.).

14. Хинт И.А., Кузьминов В.А. Производство силикальцита и его применение в жилищном строительстве. Таллин, 1958. 216 с.
Khint I.A., Kuz'minov V.A. *Production of Silicalcite and its Use in Housing Construction*. Tallin, 1958. 216 p. (In Russ.).
15. Цывин М.М., Котцов С.Г., Шмаков И.В. Производство древесной муки. М.: Лесн. пром-сть, 1982. 134 с.
Tsyvin M.M., Kottsov S.G., Shmakhov I.V. *Wood Flour Production*. Moscow, Lesnaya promyshlennost' Publ., 1982. 134 p. (In Russ.).
16. Чистова Н.Г., Матыгулина В.Н., Алашкевич Ю.Д. Подготовка древесноволокнистых полуфабрикатов в ножевых размалывающих машинах различной модификации // Химия растит. сырья. 2020. № 4. С. 459–466.
Chistova N.G., Matygulina V.N., Alashkevich Yu.D. Preparation of Wood-Fiber Semi-Finished Products in Knife Machines of Various Modification. *Khimiya Rastitel'nogo Syr'ya*, 2020, no. 4, pp. 459–466. (In Russ.). <https://doi.org/10.14258/jcprm.2020048189>
17. Aliev S.S., Egamberdiev E.A., Akmalova G.Yu., Ilkhamov G.Yu. Analysis of Physical-Mechanical Properties of New Type of Wood-Polymer Composite Materials. *Harvard Educational and Scientific Review*, 2023, vol. 3, iss. 1, pp. 48–53.
18. Delviawan A., Kojima Y., Kobori H., Suzuki S., Aoki K., Ogoe S. The Effect of Wood Particle Size Distribution on the Mechanical Properties of Wood-Plastic Composite. *Journal of Wood Science*, 2019, vol. 65, art. no. 67. <https://doi.org/10.1186/s10086-019-1846-9>
19. Karinkanta P., Ämmälä A., Illikainen M., Niinimäki J. Fine Grinding of Wood – Overview from Wood Breakage to Applications. *Biomass and Bioenergy*, 2018, vol. 113, pp. 31–44. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2018.03.007>
20. Pokhrel G., Gardner D.J., Han Y. Properties of Wood-Plastic Composites Manufactured from Two Different Wood Feedstocks: Wood Flour and Wood Pellets. *Polymers*, 2021, vol. 13, no. 16, art. no. 2769. <https://doi.org/10.3390/polym13162769>
21. Pokhrel G., Han Y., Gardner D.J. Comparative Study of the Properties of Wood Flour and Wood Pellets Manufactured from Secondary Processing Mill Residues. *Polymers*, 2021, vol. 13, no. 15, art. no. 2487. <https://doi.org/10.3390/polym13152487>
22. Pušnik Črešnar K., Fras Zemljič L., Slemenik Perše L., Bek M. Effect of Wood Fiber Loading on the Chemical and Thermo-Rheological Properties of Unrecycled and Recycled Wood-Polymer Composites. *Applied Sciences*, 2020, vol. 10, no. 24, art. no. 8863. <https://doi.org/10.3390/app10248863>
23. Rajaonariony K.R., Mayer-Laigle C., Piriou B., Rouau X. Comparative Comminution Efficiencies of Rotary, Stirred and Vibrating Ball-Mills for the Production of Ultrafine Biomass Powders. *Energy*, 2021, vol. 227, art. no. 120508. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2021.120508>
24. Sturges H.A. The Choice of a Class Interval. *Journal of the American Statistical Association*, 1926, vol. 21, iss. 153, pp. 65–66. <https://doi.org/10.1080/01621459.1926.10502161>
25. Wang J., Gao J., Brandt K.L., Wolcott M.P. Energy Consumption of Two-Stage Fine Grinding of Douglas-Fir Wood. *Journal of Wood Science*, 2018, vol. 64, pp. 338–346. <https://doi.org/10.1007/s10086-018-1712-1>

Конфликт интересов: Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов
Conflict of interest: The authors declare that there is no conflict of interest

Вклад авторов: Все авторы в равной доле участвовали в написании статьи
Authors' Contribution: All authors contributed equally to the writing of the article