

УДК 674.023

Б. В. Войтеховский, С. А. Гриневич, А. Ф. Аникеенко
Белорусский государственный технологический университет

**ЭНЕРГОЕМКОСТЬ ПРОЦЕССА ФРЕЗЕРОВАНИЯ КРОМОК
ЛАМИНИРОВАННЫХ ДРЕВЕСНОСТРУЖЕЧНЫХ ПЛИТ
НАКЛОННЫМИ РЕЖУЩИМИ ЭЛЕМЕНТАМИ**

В настоящее время энерго- и ресурсосбережение является одной из наиболее актуальных задач для производства. Одним из направлений решения данной задачи может быть установление рациональных режимов механической обработки древесины и древесных материалов, обеспечивающих требуемое качество обработки при минимальных энергетических затратах.

В мебельной промышленности широкое применение находят ламинированные древесностружечные плиты. Фрезерование кромок этого материала является довольно энергоемким процессом, и снижение энергетических затрат представляет собой важную задачу как с научной, так и с практической точки зрения. Одним из способов снижения энергопотребления и повышения качества обработки является создание угла наклона режущих элементов.

В представленной статье приводятся данные экспериментальных исследований по изучению влияния технологических режимов на энергоемкость процесса фрезерования ламинированных древесностружечных плит. В отличие от потребляемой мощности удельная работа резания является более объективной характеристикой энергоемкости процесса и представляет собой работу, затрачиваемую на снятие единицы объема стружки. Отличительной особенностью данного исследования является то, что рассмотрены не только общепринятые технологические факторы, влияющие на энергоемкость процесса фрезерования, такие как угол резания, скорость резания, высота снимаемого слоя, толщина стружки, но и угол наклона режущей кромки ножей. Построены графические зависимости, позволяющие наглядно оценить влияние каждого технологического фактора на энергоемкость процесса фрезерования. Установлено, что создание угла наклона режущей кромки в диапазоне от 0 до 30° позволяет снизить энергоемкость процесса до 54%.

Ключевые слова: энергоемкость, фрезерование, скорость резания, ламинированная древесностружечная плита, мощность.

Для цитирования: Войтеховский Б. В., Гриневич С. А., Аникеенко А. Ф. Энергоемкость процесса фрезерования кромок ламинированных древесностружечных плит наклонными режущими элементами // Труды БГТУ. Сер. 1, Лесное хоз-во, природопользование и перераб. возобновляемых ресурсов. 2023. № 2 (270). С. 232–237. DOI: 10.52065/2519-402X-2023-270-2-27.

B. V. Voitekhovsky, S. A. Grinevich, A. F. Anikeenko
Belarusian State Technological University

**ENERGY INTENSITY OF THE LAMINATED CHIPBOARD EDGES
MILLING PROCESS WITH INCLINED CUTTING ELEMENTS**

Currently, energy and resource conservation is one of the most urgent tasks for production. One of the ways to solve this problem is the establishment of rational modes of wood and wood materials mechanical processing, ensuring the required quality of processing with minimal energy costs.

Laminated chipboards are widely used in the furniture industry. Milling the edges of this material is a rather energy-intensive process and reducing energy costs is an important task both from a scientific and practical point of view. One of the ways to reduce energy consumption and improve the processing quality is to create an inclination angle of cutting elements.

The article presents the experimental studies data of the technological modes influence on the energy intensity of the laminated chipboard milling process. In contrast to the power consumption, the specific cutting work is the more objective characteristic of the process energy intensity and represents the work consumption on removing a unit of chip volume. A distinctive feature of this study is consider not only the generally accepted technological factors affecting the energy intensity of the milling process, such as the cutting angle, cutting speed, height of the removed layer, chip thickness, but also the inclination angle of the knives cutting edge. Graphical dependencies that allow visual assess the impact of each technological factor on the energy intensity of the milling process are constructed. It is established that the creation of the inclination angle of the cutting edge in the range from 0 to 30 reduces the energy intensity of the process by up to 54%.

Keywords: energy intensity, milling, cutting speed, laminated chipboard, power.

For citation: Voitechovsky B. V., Grinevich S. A., Anikeenko A. F. Energy intensity of the laminated chipboard edges milling process with inclined cutting elements. *Proceedings of BSTU, issue 1, Forestry. Nature Management. Processing of Renewable Resources*, 2023, no. 2 (270), pp. 232–237. DOI: 10.52065/2519-402X-2023-270-2-27 (In Russian).

Введение. В мебельной промышленности широкое распространение нашли ламинированные древесностружечные плиты (ЛДСП). Обработка кромок заготовок из данного вида древесного материала методом фрезерования обеспечивает высокое качество получаемой продукции. Древесностружечные плиты обладают повышенными абразивными свойствами, поэтому в качестве режущего инструмента применяют резцы, изготовленные из материалов, обладающих повышенной износостойкостью (твердые сплавы, алмазы и др.).

Фрезерование кромок ЛДСП является довольно энергоемким процессом. В качестве одного из способов снижения потребляемой мощности и повышения качества обработки используют создание угла наклона режущих элементов. Эффективность этого приема для натуральной древесины экспериментально доказана в работах В. Д. Лескива [1] и А. М. Векшина [2]. Однако эти результаты не могут быть применены к ламинированным древесностружечным плитам в силу специфических физико-механических свойств данного древесного материала. В то же время установлено, что создание угла наклона при фрезеровании ламинированных древесностружечных плит позволяет повысить стойкость режущего инструмента [3–5].

Целью данного исследования является определение влияния основных технологических факторов (угла наклона режущей кромки ω , угла резания δ , скорости резания V , толщины снимаемого слоя h , толщины стружки a) на энергоемкость процесса фрезерования ламинированных древесностружечных плит.

Основная часть. В работах [6, 7] приведены результаты выполненных исследований по определению влияния основных переменных технологических факторов на мощность, затрачиваемую при цилиндрическом фрезеровании кромок ламинированных древесностружечных плит. Однако мощность процесса не в полной мере характеризует его энергозатратность. Мощность, по определению, это работа, отнесенная к единице времени. Другой важной величиной, широко применяемой в теории резания древесины и древесных материалов, является удельная работа резания K [8–11].

$$K = \frac{A}{V_{\text{ст}}}, \quad (1)$$

где A – затраченная работа, Дж; $V_{\text{ст}}$ – объем снятого слоя, см^3 .

Таким образом, удельная работа – это работа, затрачиваемая на снятие 1 см^3 объема стружки. Также удельная работа резания может быть выражена через мощность:

$$K = \frac{60 \cdot N_0}{b \cdot h \cdot v_s}, \quad (2)$$

где N_0 – потребляемая мощность при остром резце, Вт; b – ширина обрабатываемой заготовки, мм; h – величина снимаемого припуска, мм; v_s – скорость подачи, м/мин.

$$v_s = \frac{S_z \cdot z \cdot n}{1000}, \quad (3)$$

где S_z – подача на резец, мм; z – число режущих элементов, шт.; n – частота вращения режущего инструмента, мин^{-1} .

$$S_z = \frac{a}{\sqrt{\frac{h}{D}}}, \quad (4)$$

где a – средняя толщина стружки, мм; D – диаметр фрезы, мм.

$$n = \frac{60 \cdot 1000 \cdot v}{\pi \cdot D}, \quad (5)$$

где v – скорость резания, м/с.

Подставив значения из формул (3)–(5) в формулу (2) и преобразовав, получим

$$K = \frac{N_0 \cdot \pi \cdot \sqrt{\frac{D}{h}}}{b \cdot a \cdot z \cdot v}. \quad (6)$$

Формулу (6) и будем использовать для расчета удельной работы резания.

При проведении опытов применен метод планирования эксперимента и выбран план B_5 . Для проведения эксперимента была специально разработана конструкция сборной цилиндрической фрезы с изменяемыми углами наклона режущей кромки и углами резания [12]. Условия выполнения исследований аналогичны приведенным в работе [5]. Основными переменными технологическими факторами приняты: угол наклона резца в плане ω , угол резания δ , скорость резания v , толщина срезаемого слоя (припуск) h , средняя толщина стружки a .

В результате статистической обработки данных получено уравнение регрессии для начальной мощности:

$$\begin{aligned} N_0 = & -598,98 - 5,51 \cdot \omega - 9,63 \cdot \delta + 59,75 \cdot v + \\ & + 64,84 \cdot h + 178,56 \cdot a - 1,19 \cdot v^2 - 6682,75 \times \\ & \times a^2 + 0,42 \cdot \delta \cdot v + 41,73 \cdot \delta \cdot a + 41,6 \cdot v \cdot a. \end{aligned} \quad (7)$$

Адекватность полученной математической модели подтверждена проверкой по F-критерию Фишера [13, 14].

Для того чтобы проанализировать влияние выбранных переменных технологических факторов на энергоемкость процесса фрезерования, по полученному уравнению построены графические зависимости на верхнем, среднем и нижнем уровнях варьирования.

На рис. 1 представлена зависимость удельной работы резания от угла наклона ножа фрезы в плане.

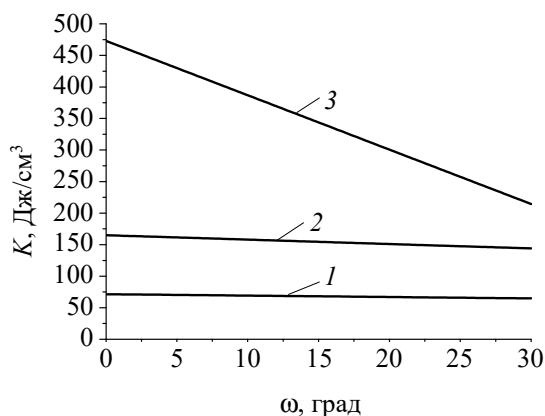


Рис. 1. Влияние угла наклона режущей кромки ω на удельную работу резания:

- 1 – $a = 0,45$ мм; $h = 4,5$ мм; $v = 50$ м/с; $\delta = 80^\circ$;
 2 – $a = 0,25$ мм; $h = 3,0$ мм; $v = 35$ м/с; $\delta = 70^\circ$;
 3 – $a = 0,05$ мм; $h = 1,5$ мм; $v = 20$ м/с; $\delta = 60^\circ$

Из представленной зависимости следует, что с увеличением угла в плане удельная работа резания падает. Уменьшение потребляемой мощности связано с плавностью входа режущего элемента в обрабатываемый материал и эффектом кинематического заострения ножа.

Зависимость удельной работы резания от угла резания представлена на рис. 2.

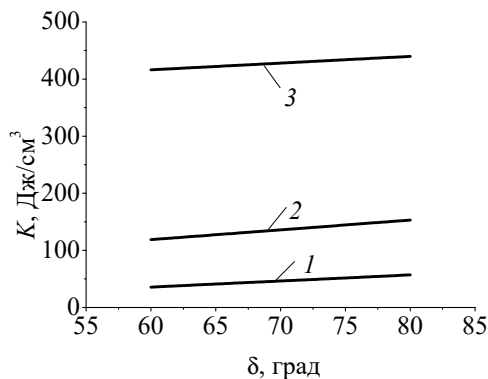


Рис. 2. Влияние угла резания δ на удельную работу резания:

- 1 – $a = 0,45$ мм; $h = 4,5$ мм; $v = 50$ м/с; $\omega = 30^\circ$;
 2 – $a = 0,25$ мм; $h = 3,0$ мм; $v = 35$ м/с; $\omega = 15^\circ$;
 3 – $a = 0,05$ мм; $h = 1,5$ мм; $v = 20$ м/с; $\omega = 0^\circ$

Здесь прослеживается линейный рост начальной мощности при увеличении угла резания. Данный эффект может быть объяснен ухудшением условий схода стружки и увеличением давления на переднюю поверхность ножа.

На рис. 3 представлен график, иллюстрирующий зависимость удельной работы резания от скорости резания.

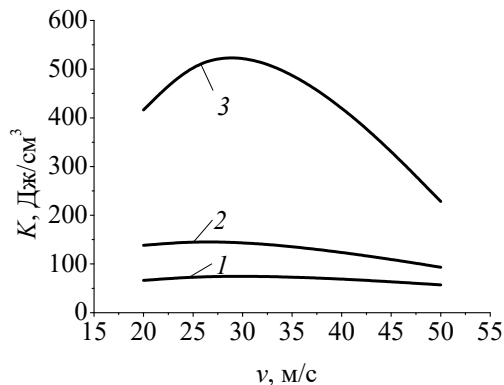


Рис. 3. Влияние скорости резания на удельную работу резания:

- 1 – $a = 0,45$ мм; $h = 4,5$ мм; $\omega = 30^\circ$; $\delta = 80^\circ$;
 2 – $a = 0,25$ мм; $h = 3,0$ мм; $\omega = 15^\circ$; $\delta = 70^\circ$;
 3 – $a = 0,05$ мм; $h = 1,5$ мм; $\omega = 0^\circ$; $\delta = 60^\circ$

С увеличением скорости резания удельная работа резания изменяется по сложной криволинейной зависимости, близкой к параболической. Особенно ярко выражена кривизна графика для нижнего уровня варьирования переменных факторов. Здесь удельная работа резания повышается с увеличением скорости от 20 до 30 м/с, но дальнейшее увеличение скорости резания до 50 м/с приводит к ее падению. Как указывает В. И. Любченко [15], скорость резания влияет на выходные показатели процесса резания через противоречиво действующие факторы. В частности, увеличение скорости резания, с одной стороны, приводит к росту энергозатрат на преодоление сил инерции от разгона срезаемой стружки, но с другой стороны это может вызвать снижение коэффициента трения. На нулевом и верхнем уровнях варьирования переменных факторов это влияние не столь значительно.

Графические зависимости на рис. 4 отражают влияние величины снимаемого припуска на удельную работу резания.

Во всех случаях с ростом величины припуска наблюдается падение удельной работы резания за исключением кривой, построенной на нижнем уровне варьирования переменных факторов, где в диапазоне h от 3,8 до 4,5 мм наблюдается незначительный рост. Такое поведение зависимостей связано с противоречивым влиянием величины припуска на удельную работу резания. Если обратиться к формуле (2), то рост величины

снимаемого припуска должен приводить к падению K , но при этом на всех уровнях варьирования увеличение h вызывает рост затрачиваемой мощности и, соответственно, удельной работы резания.

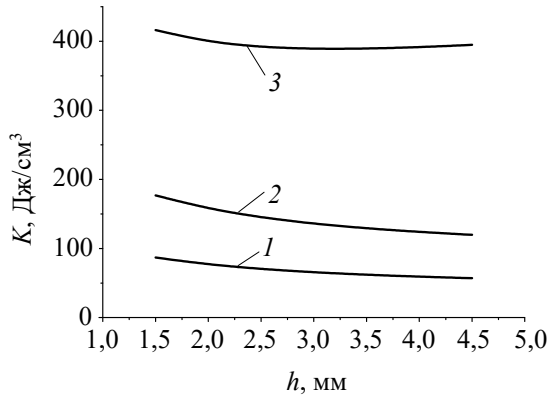


Рис. 4. Влияние высоты снимаемого слоя на удельную работу резания:

- 1 – $a = 0,45$ мм; $v = 50$ м/с; $\omega = 30^\circ$; $\delta = 80^\circ$;
2 – $a = 0,25$ мм; $v = 35$ м/с; $\omega = 15^\circ$; $\delta = 70^\circ$;
3 – $a = 0,05$ мм; $v = 20$ м/с; $\omega = 0^\circ$; $\delta = 60^\circ$

Графики зависимости удельной работы резания от толщины стружки представлены на рис. 5.

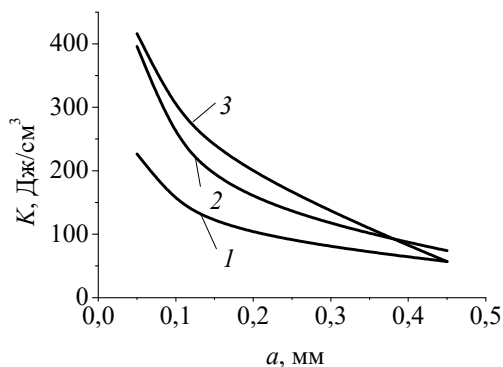


Рис. 5. Влияние толщины стружки на удельную работу резания:

- 1 – $\delta = 80^\circ$; $h = 4,5$ мм; $v = 50$ м/с; $\omega = 30^\circ$;
2 – $\delta = 70^\circ$; $h = 3,0$ мм; $v = 35$ м/с; $\omega = 15^\circ$;
3 – $\delta = 60^\circ$; $h = 1,5$ мм; $v = 20$ м/с; $\omega = 0^\circ$

Как следует из зависимостей, рост толщины стружки во всех случаях приводит к снижению энергоемкости процесса фрезерования ламинированных древесностружечных плит. Это вполне закономерное явление, наблюдающееся также и для натуральной древесины. Чем больше толщина снимаемой стружки, тем меньше проходов требуется лезвию, чтобы срезать единицу объема материала.

И наоборот, чем меньше толщина стружки, тем, конечно, меньше и нагрузка на переднюю поверхность режущего элемента, но потребуются значительно большее количество резов, чтобы снять единицу припуска.

Закключение. На основании полученной зависимости влияния переменных технологических факторов на удельную работу резания при фрезеровании кромок ЛДСП сделаны следующие выводы.

1. Установлено, что наклон режущих элементов фрезы в плане при обработке ламинированных ДСП приводит к снижению энергоемкости процесса на нижнем уровне варьирования в 2,20 раза, на верхнем – в 1,10 раза.

2. Рост угла резания вызывает увеличение удельной работы резания в 1,05 раза на нижнем уровне варьирования, в 1,62 раза – на верхнем.

3. Скорость резания неоднозначно влияет на энергоемкость процесса. Особенно это проявляется на нижнем уровне переменных факторов, где от 20 до 30 м/с наблюдается рост удельной работы резания в 1,27 раза, а затем при дальнейшем увеличении скорости – падение в 2,32 раза.

4. При увеличении припуска с 1,5 до 4,5 мм на верхнем и нулевом уровнях варьирования переменных факторов наблюдается падение удельной работы резания в 1,05–1,47 раза соответственно, и только на нижнем уровне при росте припуска от 3,8 до 4,5 мм наблюдается незначительный рост.

5. Увеличение толщины стружки от 0,05 до 0,45 мм на всех уровнях варьирования вызывает резкое падение энергоемкости процесса фрезерования. В результате на нижнем уровне варьирования значение энергоемкости уменьшается в 7,42 раза, на верхнем – в 3,96 раза.

Список литературы

1. Лискив В. Д. Исследование зависимостей силовых и качественных показателей процесса цилиндрического фрезерования древесины от положения лезвия относительно направления резания: автореф. дис. ... канд. техн. наук. Львов, 1973. 24 с.
2. Векшин А. М. Исследование процесса цилиндрического фрезерования древесины тонкими винтовыми ножами: автореф. дис. ... канд. техн. наук. М., 1970. 31 с.
3. Войтеховский Б. В., Гриневич С. А., Лукаш В. Т. Исследование стойкости фрезерного инструмента с наклонными резами при обработке кромок ДСП // Труды БГТУ. Сер. II, Лесная и деревообработка. 2007. Вып. XV. С. 225–229.
4. Гришкевич А. А., Аникеенко А. Ф., Гаранин В. Н. Особенности фрезерного сборного инструмента с изменяемыми углами: передним и наклона режущей кромки // Труды БГТУ. 2014. № 2: Лесная и деревообработка. С. 175–177.

5. Войтеховский Б. В., Гриневич С. А. Особенности износа твердосплавного инструмента при фрезеровании ламинированных ДСтП наклонными ножами // Труды БГТУ. 2011. № 2: Лесная и деревооб. пром-сть. С. 252–255.
6. Гриневич С. А., Войтеховский Б. В. Исследование технологической стойкости при фрезеровании ламинированных древесностружечных плит наклонными резцами // Труды БГТУ. Сер. II, Лесная и деревооб. пром-сть. 2010. Вып. XVIII. С. 284–286.
7. Аникеенко А. Ф., Фридрих А. П. Рекомендации по методике проведения исследований в области механической обработки ламинированных древесностружечных плит // Труды БГТУ. 2011. № 2: Лесная и деревооб. пром-сть. С. 313–317.
8. Любченко В. Н. Резание древесины и древесных материалов: учеб. пособие. М.: Лесная пром-сть, 1986. 296 с.
9. Бершадский А. Л., Цветкова Н. И. Резание древесины: учеб. пособие. Минск: Выш. шк., 1975. 304 с.
10. Гришкевич А. А., Гаранин В. Н. Механическая обработка древесины и древесных материалов, управление процессами резания. Лабораторный практикум: учеб.-метод. пособие. Минск: БГТУ, 2014. 90 с.
11. Зотов Г. И. Энергоемкость резания // Дерево.RU. 2008. № 1. С. 132–134.
12. Войтеховский Б. В., Гриневич С. А. Влияние технологических факторов на качество обработанной поверхности при фрезеровании ламинированных ДСтП // Труды БГТУ. Сер. II, Лесная и деревооб. пром-сть. 2008. Вып. XVI. С. 323–327.
13. Пижурич А. А., Пижурич А. А. Моделирование и оптимизация процессов деревообработки. М.: Моск. гос. ун-т леса, 2004. 376 с.
14. Пижурич А. А., Розенблит М. С. Исследования процессов деревообработки. М.: Лесн. пром-сть, 1984. 232 с.
15. Любченко В. И. Резание древесины и древесных материалов: учеб. пособие для ВУЗов. 2-е изд., испр. и доп. М.: Моск. гос. ун-т леса, 2002. 309 с.

References

1. Liskiv V. D. *Issledovaniye zavisimostey silovykh i kachestvennykh pokazateley protsesssa tsilindricheskogo frezerovaniya drevesiny ot polozheniya lezviya otnositel'no napravleniya rezaniya* [Investigation of the dependence of power and quality indicators of the process of cylindrical wood milling on the position of the blade relative to the cutting direction. Abstracts of thesis PhD (Engineering)]. Lvov, 1973. 24 p. (In Russian).
2. Vekshin A. M. *Issledovaniye protsesssa tsilindricheskogo frezerovaniya drevesiny tonkimi vintovymi nozhami* [Investigation of the process of cylindrical wood milling with thin screw knives. Abstracts of thesis PhD (Engineering)]. Moscow, 1970. 31 p. (In Russian).
3. Voitekhovsky B. V., Grinevich S. A., Lukash V. T. Study of the durability of milling tools with inclined cutters when processing chipboard edges. *Trydy BGTU* [Proceedings of BSTU], series II, Forest and Woodworking Industry, 2007, issue XV, pp. 225–229 (In Russian).
4. Grishkevich A. A., Anikeenko A. F., Garanin V. N. Features of the milling combined tool with changeable corners: to lobbies and an inclination of the cutting edge. *Trudy BGTU* [Proceedings of BSTU], 2014, no. 2: Forest and Woodworking Industry, pp. 175–177 (In Russian).
5. Voitekhovsky B. V., Grinevich S. A. Features of wear of hard-alloy tools during milling of laminated chipboard with inclined knives. *Trydy BGTU* [Proceedings of BSTU], 2011, no. 2: Forest and Woodworking Industry, pp. 252–255 (In Russian).
6. Grinevich S. A., Voitekhovsky B. V. Investigation of technological stability during milling of laminated chipboards with inclined cutters. *Trydy BGTU* [Proceedings of BSTU], series II, Forest and Woodworking Industry, 2010, issue XVIII, pp. 284–286 (In Russian).
7. Anikeenko A. F., Friedrich A. P. Recommendations on the methodology for conducting research in the field of mechanical processing of laminated chipboards. *Trudy BGTU* [Proceedings of BSTU], 2011, no. 2: Forest and Woodworking Industry, pp. 313–317 (In Russian).
8. Lyubchenko V. N. *Rezaniye drevesiny i drevesnykh materialov* [Wood cutting and wood materials]. Moscow, Lesnaya promyshlennost' Publ., 1986. 296 p. (In Russian).
9. Bershadskiy A. L., Tsvetkova N. I. *Rezaniye drevesiny* [Wood cutting]. Minsk, Vysheyschaya shkola Publ., 1975. 304 p. (In Russian).
10. Grishkevich A. A., Garanin V. N. *Mekhanicheskaya obrabotka drevesiny i drevesnykh materialov, upravleniye protsessami rezaniya. Laboratornyy praktikum* [Mechanical processing of wood and wood materials, cutting process control. Laboratory workshop]. Minsk, BGTU Publ., 2014. 90 p. (In Russian).
11. Zotov G. I. Energy intensity of cutting. *Derevo.RU* [Wood.RU], 2008, no. 1, pp. 132–134 (In Russian).

12. Voitekhovsky B. V., Grinevich S. A. Influence of technological factors on the quality of the machined surface during milling of laminated chipboard. *Trydy BGTU* [Proceedings of BSTU], series II, Forest and Woodworking Industry, 2008, issue XVI, pp. 323–327 (In Russian).

13. Pizhurin A. A., Pizhurin A. A. *Modelirovaniye i optimizatsiya protsessov derevoobrabotki* [Modeling and optimization of woodworking processes]. Moscow, Moscow State Forest University Publ., 2004. 376 p. (In Russian).

14. Pizhurin A. A., Rozenblit M. S. *Issledovaniya protsessov derevoobrabotki* [Research of woodworking processes]. Moscow, Lesnaya promyshlennost' Publ., 1984. 232 p. (In Russian).

15. Lyubchenko V. I. *Rezaniye drevesiny i drevesnykh materialov* [Cutting wood and wood materials]. Moscow, Moscow State Forest University Publ., 2002. 309 p. (In Russian).

Информация об авторах

Войтеховский Борис Викторович – старший преподаватель кафедры инженерной графики. Белорусский государственный технологический университет (220006, г. Минск, ул. Свердлова, 13а, Республика Беларусь). E-mail: voitechovskiy@belstu.by

Гриневич Сергей Анатольевич – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры деревообрабатывающих станков и инструментов. Белорусский государственный технологический университет (220006, г. Минск, ул. Свердлова, 13а, Республика Беларусь). E-mail: gres410a@ya.ru

Аникеенко Андрей Федорович – кандидат технических наук, доцент кафедры деревообрабатывающих станков и инструментов. Белорусский государственный технологический университет (220006, г. Минск, ул. Свердлова, 13а, Республика Беларусь). E-mail: dosy@belstu.by

Information about the authors

Voitekhovsky Boris Viktorovich – Senior Lecturer, the Department of Engineering Graphics. Belarusian State Technological University (13a, Sverdlova str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: voitechovskiy@belstu.by

Grinevich Sergey Anatol'yevich – PhD (Engineering), Associate Professor, Assistant Professor, the Department of Woodworking Machines and Tools. Belarusian State Technological University (13a, Sverdlova str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: gres410a@ya.ru

Anikeenko Andrey Fedorovich – PhD (Engineering), Assistant Professor, the Department of Woodworking Machines and Tools. Belarusian State Technological University (13a, Sverdlova str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: dosy@belstu.by

Поступила 15.03.2023