

Научная статья

УДК 674.02

DOI: 10.37482/0536-1036-2023-2-132-145

Морфологический анализ и оптимизация технологического процесса продольного раскря круглых лесоматериалов

А.С. Торопов¹, д-р техн. наук, проф.; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4414-2505>

В.Е. Бызов², канд. техн. наук, доц.; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2078-5226>

¹Поволжский государственный технологический университет, пл. Ленина, д. 3, г. Йошкар-Ола, Республика Марий-Эл, Россия, 424000; Toropov_A_S@mail.ru

²Санкт-Петербургский государственный лесотехнический университет им. С.М. Кирова, Институтский пер., д. 5, Санкт-Петербург, Россия, 194021; marana@inbox.ru

Поступила в редакцию 14.01.22 / Одобрена после рецензирования 20.04.22 / Принята к печати 24.04.22

Аннотация. Пиломатериалы хвойных пород находят широкое применение в строительстве. Однако в последнее время размерно-качественный состав круглых лесоматериалов для изготовления пиломатериалов значительно ухудшился. Количество пиловочных бревен диаметром 14–20 см составляет только до 50 % от общего количества сырья, поступающего на лесопильные предприятия. Кроме того, круглые лесоматериалы больших диаметров все чаще поражаются различными видами гнилей, как правило, ядровыми гнилями. Таким образом, необходимо бережно использовать пиловочное сырье. Встает задача интенсификации процесса раскря круглых лесоматериалов. Это особенно важно при раскря круглых лесоматериалов с присутствием ядровой гнили. Решение задачи возможно при применении современных технологических процессов раскря и специализированного оборудования. Для выбора технологической схемы раскря и конструктивных решений установок для продольного раскря круглых лесоматериалов применен метод морфологических исследований. Полнота морфологической таблицы определяется суммой объектов понятий всех признаков и оценивается результативностью получения эффективных технологических и конструктивных решений. С использованием морфологического метода разработана методика систематизации поиска. В результате патентного поиска выявлены основные охраняемые и опубликованные заявочные документы, касающиеся программ продольного раскря круглых лесоматериалов. С учетом установленных закономерностей рассмотрены технологические схемы продольного раскря круглых лесоматериалов и конструктивные схемы оборудования для раскря. В целях повышения производительности оборудования для продольного раскря круглых лесоматериалов предложена новая программа раскря. Программа защищена патентом Российской Федерации. Оценка возможностей осуществления технологического процесса продольного раскря круглых лесоматериалов выполнена путем анализа целевых функций затрат на организацию производства, производительности в смену и качественного выхода продукции раскря. Предложенная методика выбора направлений интенсификации продольного раскря круглых лесоматериалов позволяет определять эффективные технологические и технические решения на предпроектной стадии.

Ключевые слова: круглые лесоматериалы, интенсификация продольного раскря лесоматериалов, морфологические исследования, технологическая схема раскря, конструктивные решения оборудования, оптимизация технологического процесса раскря

Для цитирования: Торопов А.С., Бызов В.Е. Морфологический анализ и оптимизация технологического процесса продольного раскроя круглых лесоматериалов // Изв. вузов. Лесн. журн. 2023. № 2. С. 132–145. <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2023-2-132-145>

Original article

Morphological Analysis and Optimization of Technological Process for Rip Cutting of Round Timber

*Aleksandr S. Toropov*¹, Doctor of Engineering, Prof.;

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4414-2505>

Viktor E. Byzov^{2✉}, Candidate of Engineering, Assoc. Prof.;

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2078-5226>

¹Volga State University of Technology, pl. Lenina, 3, Yoshkar-Ola, Mari El Republic, 424000, Russian Federation; Toropov_A_S@mail.ru

²St. Petersburg State Forest Technical University named after S.M. Kirov, Institutskiy per., 5, Saint Petersburg, 194021, Russian Federation; mapana@inbox.ru✉

Received on January 14, 2022 / Approved after reviewing on April 20, 2022 / Accepted on April 24, 2022

Abstract. Coniferous sawn timber is extensively used in construction. However, the dimensional and qualitative composition of the round timber for lumber production has recently deteriorated significantly. The number of sawn logs with a diameter of 14–20 cm represents barely 50 % of the total supply of raw materials for sawmills. Besides that, large-diameter logs frequently have some signs of decay, which is mostly heartwood rot. Thus, the sawlog must be handled with caution. The problem is to intensify the sawing process, especially when logs have a presence of heartwood rot. This is possible to achieve with the implementation of modern technological sawing processes and specified equipment. A method of morphological research is used to select flowsheet diagrams of sawing and construction solutions for rip cutting equipment. The completeness of the morphological table is determined by the sum of all properties of the concept objects and is evaluated by obtaining effective technological and constructive solutions. According to the morphological method, a procedure of search systematization is developed. The patent search identified the main protective and published application documents concerning programs about ripping machines for round timber. The flowsheet diagrams for rip cutting of round timber and operational schemes for the equipment are adjusted according to the discovered regularities. A new sawing program is proposed in order to improve the efficiency of the equipment. It was licensed under a national patent of the Russian Federation. The evaluation of the possibility of implementing the technological process is made by analyzing the target costs for the production arrangement, the production rate per shift, and the quality of the final products. The proposed method for selecting directions to intensify the rip cutting of round timber gives the possibility to determine the effective technological and technical decisions at a project's preliminary problem-solving stage.

Keywords: round timber, intensification of timber rip cutting, morphological studies, flowsheet diagram of sawing, construction solution for equipment, sawing optimization

For citation: Toropov A.S., Byzov V.E. Morphological Analysis and Optimization of Technological Process for Rip Cutting of Round Timber. *Lesnoy Zhurnal = Russian Forestry Journal*, 2023, no. 2, pp. 132–145. (In Russ.). <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2023-2-132-145>

Введение

Для изготовления элементов несущих строительных конструкций применяют пиломатериалы хвойных пород. Согласно требованиям нормативно-технической документации, присутствие гнили в пиломатериалах для строительства не допускается. В то же время качество круглых лесоматериалов хвойных пород постоянно ухудшается: при заготовке древесины они попадают в разряд низкокачественных из-за наличия гнили, которая поражает ядровую древесину и выходит на один или оба торца сортимента. Такие лесоматериалы используют для производства технологической щепы или как дровяную древесину.

В круглых лесоматериалах, пораженных ядровой гнилью, вокруг зоны поражения находится заболонная древесина, обладающая высокими прочностными характеристиками. Она используется нерационально. Следовательно, требуется разработка новых технологических процессов изготовления элементов строительных конструкций из древесины. Также необходимо разработать специализированное оборудование для продольного раскроя круглых лесоматериалов.

Цель исследования – проведение морфологического анализа для оптимизации технологической схемы продольного раскроя низкокачественных круглых лесоматериалов.

Объекты и методы исследования

Морфологический анализ – метод целенаправленного поиска описаний решений – разработан швейцарским ученым Ф. Цвикки в 1942 г. Основным принципом такого анализа является анализ старых систем и синтез из их элементов новых систем [5]. Сущность морфологических исследований функциональных систем заключается в том, что на базе построенной морфологической таблицы рассматриваются все возможные варианты, вытекающие из закономерностей строения (морфологии) рассматриваемой системы (стадия синтеза). При этом синтезируются как известные, так и новые варианты, которые при простом переборе могут быть упущены. Идея метода – уйти от привычных представлений, инертности мышления и расширить область поиска новых технологий и конструкций для совершенствования конкретной функциональной системы.

Морфологический анализ относится к многоаспектной классификации и заканчивается построением морфологической таблицы, которая одновременно является классификационной таблицей. По своему содержанию и объему морфологическая таблица имеет значительные преимущества по сравнению с известными схемами классификации, так как число вариантов технологических и конструктивных решений, предлагаемых такой таблицей, намного выше. Причем морфологическая таблица постоянно и достаточно быстро пополняется и совершенствуется путем открытия новых признаков и их значений, а ее структура позволяет кодировать решения с целью автоматизированного хранения информации и поиска новых решений на этапе проектирования технологического процесса. Применение метода морфологического анализа и синтеза наиболее эффективно при решении конструкторских задач общего плана (проектирование новых машин и механизмов, поиск новых компоновочных решений).

Продольный раскрой представляет собой наиболее распространенный способ переработки круглых лесоматериалов. Он осуществляется на лесопильных предприятиях с различными объемами переработки древесины. При рассмотрении функциональной системы «продольный раскрой круглых лесоматериалов» появляется возможность использования системного функционального подхода, который реализуется при построении морфологических таблиц. Основным источником информации является патентная документация. Целью данного этапа становится сбор максимального количества информации о продольном раскрое круглых лесоматериалов. Далее производится анализ собранной информации: уточняется сущность каждого решения, выбирается терминология для однозначного описания решений, устанавливается совокупность технологических и конструктивных требований, предъявляемых к выбранным решениям, выделяются наиболее эффективные и перспективные из них, намечаются тенденции развития функциональной системы, определяются направления развития решений, выделяются группы сходных решений.

Продольный раскрой круглых лесоматериалов – функциональная система, являющаяся частью общей технической системы переработки лесоматериалов. Функция продольного раскроя разделяется на подфункции, например: разделение пачки круглых лесоматериалов, подача бревен к пильному или фрезерному узлу, фрезерование и пиление бревен, перемещение досок к узлам для дальнейшей переработки. Эти подфункции осуществляются отдельными механизмами и в совокупности образуют цепочку выполняемых технологических приемов.

Важным этапом морфологического анализа является выделение классификационных признаков, инвариантных к рассматриваемой функциональной системе. Для этого необходимо разрабатывать и анализировать эволюционные цепочки технологических и конструкторских изменений функциональной системы. Кроме того, целесообразно использование обобщенных расчетных схем – например, анализ обобщенной кинематики резания позволяет расширить область влияния признаков и оценить их взаимосвязи. Часть значений признаков, малозначимых для выполнения продольного раскроя круглых лесоматериалов, возможно исключить из списка (для предмета труда это удаление отходов раскроя лесоматериалов и т. п.).

При таком рассмотрении значений признака предмета труда следует допустить, что смежные функции могут выполняться как до продольного раскроя, так и после него (например, замеры диаметров круглых лесоматериалов). Данные сочетания могут быть осуществлены только по отношению к обрабатывающим технологическим операциям (операция соответствует функции, приемы – подфункциям). Переместительные технологические операции имеют жесткую последовательность выполнения во времени и пространстве. Сравнение показывает, что признак «предмет труда» характеризуется значениями, которые можно расположить в порядке уменьшения от естественного состояния (растущее дерево) до определенного конечного состояния (доска). Аналогичным образом анализируются другие функционально-значимые отношения. В соответствии с известными методами исследований параметров технологий и технических объектов функциональные отношения распределяются по следующим группам: предмет труда, струк-

тура, свойства и параметры элементов функциональной системы; средства при реализации принятой функции по отношению к изменениям предмета труда; характер взаимодействия функциональной системы с предметом труда (кинематика, динамика, расположение в пространстве); комбинация найденных функциональных отношений.

Полнота морфологической таблицы определяется суммой объектов понятий всех признаков и оценивается результативностью получения эффективных технологических и конструктивных решений. При большой концентрации морфологической таблицы учитывается большое число свойств функциональной системы и функциональных отношений между ее элементами, однако чрезмерно возрастает количество условных вариантов, равное произведению всех значений признаков. Поэтому вводятся внешние ограничения, которые определяются технологическими и конструктивными требованиями к искомым вариантам системы, и внутренние, выявляющиеся исходя из условий совместности значений признаков друг с другом.

Синтез технологических и конструктивных решений осуществляется путем проверки соответствия условного варианта принятым требованиям и ограничениям. При выполнении указанных условий вариант решения после сравнения с решениями из научной, технической и патентной литературы может соответствовать следующим состояниям: найденное решение общеизвестно и существует на производстве; известно в научно-технической и патентной литературе; обладает научной новизной. На основе анализа и синтеза возможно дальнейшее уточнение признаков и их значений, т. е. совершенствование морфологической таблицы. Основные положения поиска новых технологических и конструктивных решений совершенствования продольного раскроя круглых лесоматериалов приведены в работах [1–3, 10–26].

При продольном раскрое круглых лесоматериалов применяют различные способы: индивидуальный, развальный и брусово-развальный. Для объективной оценки методов раскроя необходимо принимать во внимание качественные признаки распиливаемых лесоматериалов, такие как порода, влажность, температура, размеры гнили, сбеги, закомелистость, овальность, кривизна, наличие и расположение сучков и др. Целесообразно качественные признаки учитывать путем использования соответствующих известных математических моделей. В основном технологический процесс продольного раскроя круглых лесоматериалов определяется характером используемых установок, оборудования.

Были выполнены патентные исследования. В результате выявлены основные охраняемые и опубликованные заявочные документы, касающиеся программ продольного раскроя круглых лесоматериалов. Как уже отмечалось ранее, полученные решения могут быть реализованы на данный момент на производстве, известны в научно-технической и патентной литературе, обладают научной новизной. Встает проблема синтеза таких способов и устройств, которые имеют мировой уровень, т. е. были бы патентноспособны, а главное, учитывали специфику отрасли в нашей стране и помогли бы интенсифицировать продольный раскрой круглых лесоматериалов.

Способы формирования групп лесоматериалов, которые реализованы на отечественном и зарубежном оборудовании, представлены в работах [7, 8]. Известен способ поштучно-группового продольного раскроя круглых лесоматериалов.

териалов, реализуемый на установках с продольным перемещением предмета труда. Сущность способа заключается в том, что в процессе продольного раскря круглые лесоматериалы, сходные по качественным признакам и близкие по диаметрам, формируют в группы с учетом возможности установки для их одновременной обработки [4].

С целью поиска новых вариантов технологических схем поштучно-группового раскря круглых лесоматериалов можно выделить следующие основные варианты осуществления раскря путем формирования групп по нескольким близким диаметрам и дальнейшего раскря развальным, брусомо-развальным способами и способом индивидуального раскря.

На рис. 1, *а* приведен вариант технологической схемы, основанной на поштучно-продольном перемещении круглых лесоматериалов при индивидуальном способе раскря. После отделения одной доски лесоматериалы возвращаются и поворачиваются вокруг оси бревна. При данном технологическом решении могут быть достигнуты преимущества поштучного раскря круглых лесоматериалов: увеличение полезного и качественного выхода продукции раскря.

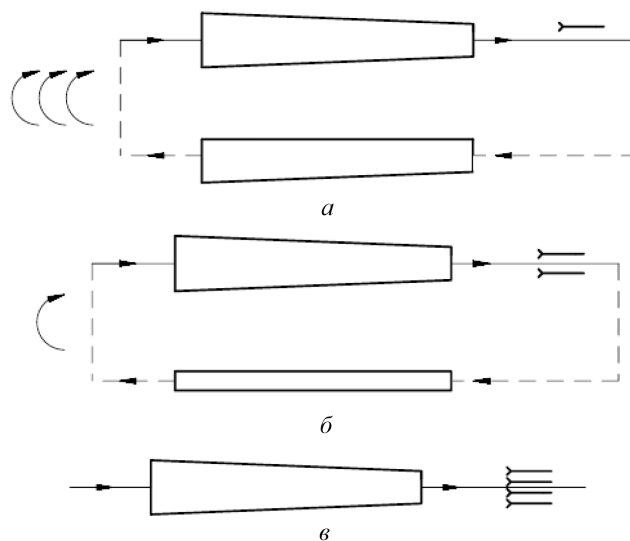


Рис. 1. Схемы способов раскря круглых лесоматериалов: *а* – индивидуальный; *б* – брусомо-развальным; *в* – развальным

Fig. 1. Schematic representation of crosscutting methods for round timber: *a* – individual; *b* – plain sawing; *c* – live sawing

На рис. 1, *б* представлен вариант технологической схемы, в основе которой лежит продольное перемещение круглых лесоматериалов при брусомо-развальным способом раскря. После получения двухкантного бруса происходит его возврат и поворот на 90° .

На рис. 1, *в* показан вариант технологической схемы развальным способом раскря круглых лесоматериалов при их продольном перемещении. Приведенные технологические решения могут обеспечить повышение производительности, создать необходимую устойчивость при распиловке круглых лесоматериалов и равномерно загрузить пильные механизмы.

Возможны и комбинированные варианты технологических решений, которые легко komponуются с использованием схем, приведенных на рис. 1. Так, на основании синтеза технических решений продольного раскроя круглых лесоматериалов запатентована новая программа раскроя круглых лесоматериалов с ядровой гнилью [6]. Согласно разработанной программе, круглые лесоматериалы сортируются на группы смежных диаметров и поштучно раскраиваются. Раскрой круглых лесоматериалов с ядровой гнилью производится на лесопильных рамах по брусово-разваль-ной схеме. Лесоматериалы закрепляются прижимами на подающем устройстве и при помощи рябук подаются к лесопильной раме 1-го ряда. Двухкантный брус центрируется на подающем устройстве и роликом подается к лесопильной раме 2-го ряда. Пильные механизмы рам представляют собой рамки с установленными в них плоскими пилами. Пилы имеют напаянные зубья. Пильная рамка совершает колебательные движения. Привод рамки осуществляется от электродвигателя с установленным на нем маховиком с кривошипом. Маховик получает вращение от электродвигателя при помощи ременной передачи. Подача круглых лесоматериалов и двухкантного бруса производится импульсно.

На 1-м проходе получают двухкантный брус с сердцевинной гнилью и боковые необрезные тонкие пиломатериалы (рис. 2, *а*), на 2-м проходе – 2 бруска с сердцевинной гнилью, а также боковые необрезные пиломатериалы (рис. 2, *б*).

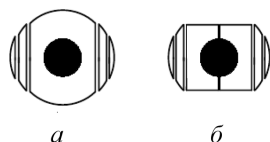


Рис. 2. Схема раскроя круглых лесоматериалов: *а* – выпилка двухкантного бруса и боковых необрезных пиломатериалов; *б* – распиловка двухкантного бруса

Fig. 2. Cutting scheme for round timber: *a* – carving of two-edged cant and side unedged lumber; *b* – sawing of two-edged cant

Далее бруски подвергаются камерной сушке мягкими режимами и влажность древесины доводится до 14 ± 2 %. Посредством фрезерования удаляется гниль. После фрезерования бруски имеют уголкового профиля (рис. 3).

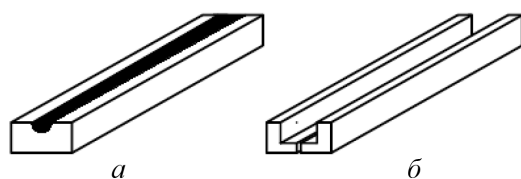


Рис. 3. Фрезерование и распиловка брусков: *а* – бруски с ядровой гнилью; *б* – элементы уголкового профиля

Fig. 3. Milling and sawing into bars: *a* – bar with heartwood rot; *b* – elements of angle bar

Бруски сортируются таким образом, чтобы качество древесины отвечало 2-му сорту по ГОСТ 8486. Это примерно соответствует классу прочности С24 по европейскому стандарту EN 338–2011. Затем бруски склеиваются попарно для получения заготовки в виде швеллера (рис. 4, *б*). Заготовки в виде швеллеров склеиваются между собой по широкой пласти, и получается двутавровая балка (рис. 4, *в*). Склеивание производится водостойким полиуретановым клеем.

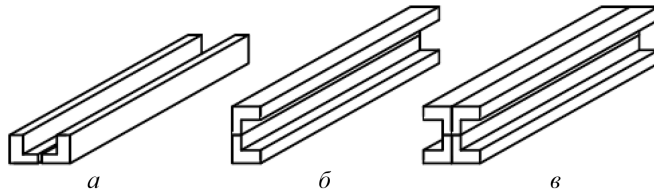


Рис. 4. Склеивание двутавровой балки: *a* – элементы уголкового профиля; *б* – уголковые элементы, склеенные в швеллер; *в* – склеенные между собой швеллеры

Fig. 4. I-beam bonding: *a* – angle bar elements; *б* – angle bar elements glued together in channel section; *в* – channel sections glued together

Разработка программы раскря осуществлялась с целью повышения производительности применяемого для раскря оборудования, увеличения качественного выхода получаемых пиломатериалов и снижения стоимости их производства. Эффективность продольного раскря круглых лесоматериалов определяется теми исходными принципами и требованиями, которые закладываются в основу технологического процесса еще на стадии проектных разработок. Установить возможности технологического процесса продольного раскря лесоматериалов на стадии предпроектного решения проблемы можно путем анализа целевых функций

$$Z = f_1(N, Y_n, Y_b) \rightarrow \min; \Pi_{\text{см}} = f_1(N, Y_n, Y_b) \rightarrow \max; K = f_1(N, Y_n, Y_b) \rightarrow \max,$$

где Z – затраты на реализацию технологического процесса, р.; N – установленная мощность привода, кВт; Y_n, Y_b – соответственно количество необходимых и возможных программ раскря; $\Pi_{\text{см}}$ – сменная производительность основного оборудования, м³; K – качественный выход продукции в стоимостном выражении.

Затраты определили по формуле

$$Z = a_1 + a_2 N,$$

где a_1, a_2 – коэффициенты, учитывающие условия использования установок для продольного раскря круглых лесоматериалов; N – общая установленная мощность двигателей установки, кВт,

$$a_1 = K_3 Z_T n_0 (1 + \alpha_b) + 0,01 K_k \Pi (P_1 + P_2) / D_c,$$

K_3 – средний коэффициент доплат для основных и вспомогательных рабочих; Z_T – средняя тарифная ставка основных и вспомогательных рабочих, р.; n_0 – число основных рабочих, занятых в смену, чел.; α_b – коэффициент, учитывающий число вспомогательных рабочих по отношению к основным; K_k – коэффициент, учитывающий расходы на доставку и монтаж основного оборудования, строительство зданий и сооружений, а также вспомогательное оборудование; Π – стоимость основного оборудования, р.; P_1, P_2 – соответственно нормативные проценты отчислений в год на текущий (средний) ремонт и амортизацию, %; D_c – число рабочих смен в году.

$$a_2 = a_N T K_c \Pi_c K_M N,$$

a_N – коэффициент, учитывающий мощность вспомогательного оборудования, обслуживающего основной механизм; T – продолжительность смены, ч;

K_c – коэффициент спроса электроэнергии; C_c – стоимость 1 кВт·ч, р.; K_m – коэффициент, учитывающий расходы на вспомогательные и смазочные материалы; N – общая установленная мощность двигателей установки для продольного раскроя круглых лесоматериалов, кВт.

Сменная производительность лесопильного потока на базе двухэтажных рам рассчитывается по формуле

$$\Pi_{cm} = 3600T\varphi_1\varphi_2 \sum \left(\frac{V_{xi}}{t_{np}} \right),$$

где φ_1 – коэффициент использования рабочего времени; φ_2 – коэффициент загрузки оборудования; V_{xi} – объем i -го обрабатываемого бревна в группе, м³; t_{np} – время распиловки бревна, с.

Качественный выход продукции в стоимостном выражении

$$K = \left(\sum_{j=1}^p K_{Mj} C_{пj} V_{пj} \right) / \sum_{j=1}^q C_{cj} V_{cj}, \quad (1)$$

где K_{Mj} – коэффициент интенсификации в результате маркетинга j -го вида продукции; p – количество видов продукции; q – количество видов сырья; $C_{пj}$, C_{cj} – соответственно стоимость единицы j -го вида продукции и сырья, р./м³; $V_{пj}$, V_{cj} – соответственно объем j -го вида продукции и сырья, м³.

Коэффициент интенсификации процесса

$$K_{Mj} = \frac{F_i + \Delta F_i}{F_i},$$

где F_i , ΔF_i – соответственно значение фактора до интенсификации и величина повышения фактора после интенсификации.

Необходимого повышения производительности установок без снижения качества раскроя можно достигнуть, используя новые способы продольного раскроя круглых лесоматериалов, основанные на продольном перемещении в процессе обработки. Качественный выход определяется количеством реализуемых программ раскроя на соответствующем оборудовании. Количество реализуемых программ раскроя на рассматриваемом оборудовании Y_b , предположительно, определяется числом автономных пильных механизмов, возможностью базирования лесоматериалов относительно пил. Очевидно, для всех установок с возможностью базирования лесоматериалов относительно пильного механизма и наоборот отношение $Y_b / Y_n = 1$, где Y_n – количество необходимых программ раскроя, реализуемых на рассматриваемой установке.

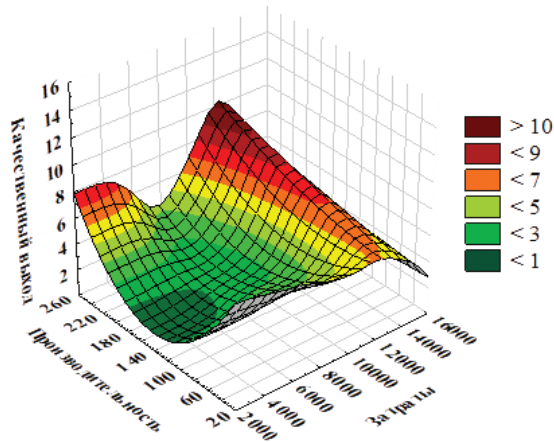
Для выполнения расчетов использован статистический пакет Stat Soft Statistica 10.0.1011 [9].

Результаты исследования и их обсуждение

Применив статистический пакет Stat Soft Statistica 10.0.1011, построили плоскостную диаграмму изменения затрат, производительности установки в смену и качественного выхода (рис. 5).

Рис. 5. Диаграмма распределения значений затрат, производительности и качественного выхода

Fig. 5. Diagram of the distribution of cost values, productivity and yield quality



Задачу поиска оптимального способа решили с использованием множества Парето (Π):

$$\Phi(x) \rightarrow \min, x \in \Pi;$$

$$\Pi = x \in D: \exists x^0 \in D; f_j(x^0) < f_j(x); \\ j = 1, m; f(x^0) \neq f(x),$$

где Φ – целевая функция; D – область допустимых решений; m – количество критериев или исходная задача; $\psi(F) \rightarrow \min, F \in \Pi_F, \Pi_F = F(\Pi)$ – образ множества Парето в пространстве локальных критериев.

При помощи метода Парето находили наиболее оптимальные решения: путь решения проблемы состоял в выделении множества Парето и организации на его основе поиска оптимального решения. Далее при необходимости множества Парето делили на подмножества решений с одинаковой структурой, обеспечивая условия применимости метода комплексного критерия.

Определить возможности технологического процесса продольного раскроя круглых лесоматериалов на стадии предпроектного решения проблемы возможно путем анализа целевой функции

$$\Phi = Z / \Pi_{cm} \rightarrow \min.$$

К управляемым (внутренним) параметрам оборудования, выбираемым конструкторами при проектировании, относится установленная мощность двигателей. Определение оптимальных мощностей является основной задачей оптимизации параметров оборудования, так как от мощности в основном зависят и остальные параметры: производительность, энергоемкость, металлоемкость и др. Оптимальную величину установленной мощности для различных и наиболее характерных внешних факторов находят по следующей методике:

устанавливают значимость $\Pi_{cm} = f(N)$ для различных внешних факторов;

определяют значимость стоимости оборудования $\Pi = \varphi(N)$ для рассматриваемых внешних факторов;

для разных внешних факторов находят целевую функцию Φ , которую стремятся минимизировать;

составляют уравнение $d\Phi / dN = 0$, решают его и получают некоторое значение N^* ;

вычисляют $d^2\Phi(N^*) / dN^2$, если полученное значение > 0 , то $N^* = N_{\text{опт}}$.

В соответствии с описанной методикой определены оптимальные параметры технологических и конструктивных решений, включающих ранее найденные точки Парето из всего морфологического множества рассматриваемой функциональной системы (см. таблицу).

Результаты оптимизации параметров установок для продольного раскроя круглых лесоматериалов с целью выбора направлений интенсификации на стадии предпроектного решения проблемы

Results of optimization parameters for rip cutting of round timber for selection of intensification options at project's preliminary problem-solving stage

Параметр	Оптимальное значение по точкам множества Парето								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Φ , р./м ³	2,51	7,18	9,21	17,60	20,99	18,33	21,30	24,84	21,63
$N_{\text{опт}}$, кВт	22,0	127,7	127,7	22,0	127,7	68,0	68,0	127,7	137,7

С использованием результатов оптимизации по методу Парето и на их основе методом комплексного критерия (1) определены эффективные варианты технологических и конструктивных решений поперечной распиловки лесоматериалов. Следует отметить, что экономические показатели принимались в расчетах с учетом реальных инфляционных процессов, а сравниваемые варианты рассматривались в равных условиях. Дальнейший выбор эффективных решений может быть осуществлен с помощью экспертных оценок этих решений.

Предложенная методика выбора направлений интенсификации продольного раскроя круглых лесоматериалов позволяет определять эффективные технологические и технические решения на предпроектной стадии.

Выводы

1. Морфологический анализ способов продольного раскроя круглых лесоматериалов как функциональных систем – многоаспектная классификация технологий, машин и оборудования – имеет преимущества по сравнению с известными схемами классификации в количественном (произведение значений всех признаков) и качественном (постоянное совершенствование признаков и их значений в системе, возможность кодировки решений с целью автоматизированного хранения известных решений и поиска новых) отношениях.

2. Разработанная методика систематизации и поиска новых технологических, конструктивных решений и ее апробация доказывают высокую эффективность морфологического метода в исследовании функциональной системы «продольный раскрой круглых лесоматериалов».

3. Результаты морфологических исследований следует использовать при создании банка данных в виде закодированных решений с целью автоматизированного хранения и поиска как известных, так и новых решений.

4. Для автоматизированного поиска новых технических и конструктивных решений продольного раскроя круглых лесоматериалов необходимо раз-

работать эвристическую, математическую модели и алгоритм поиска с учетом ограничений в системе и критерия оценки научной новизны.

5. Следует выделить прогрессивные направления интенсификации поперечной распиловки лесоматериалов:

применение поштучно-группового раскроя круглых лесоматериалов, в основе которого лежит способ продольного перемещения круглых лесоматериалов на потоках лесопильных заводов;

создание адаптивных систем (единый привод с возможностью саморегулирования режимов пиления и перемещения лесоматериалов) с целью снижения энергоемкости процесса поперечной распиловки лесоматериалов и приведенных затрат на его реализацию.

6. Дальнейшее повышение эффективности продольного раскроя круглых лесоматериалов возможно путем совершенствования раскроя с целью получения высококачественной конечной продукции.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Агапов А.И. Оптимизация раскроя пиловочника с выпиливанием трех брусьев. Киров: ВятГУ, 2019. 478 с.

Agapov A.I. *Optimization of Sawlog Cutting with Three Bars Output*. Kirov, Vyatka State University Publ., 2019. 478 p. (In Russ.).

2. Иванов А.В. Технология продольного раскроя круглых лесоматериалов // Наука без границ. 2020. № 6(46). С. 62–66.

Ivanov A.V. Technology of Longitudinal Cutting of Round Timber. *Nauka bez granits* = Science Without Borders, 2020, no. 6(46), pp. 62–66. (In Russ.).

3. Кравцов Е.В., Карпукхин Г.А. Особенности технологических решений в организации производства элементов деревянного домостроения из низкосортной древесины // Вестн. МГУЛ – Лесн. вестн. 2011. № 5. С. 93–97.

Kravtsov E.V., Karpukhin G.A. Features of Technological Solutions in the Organization of Production Elements of Housing from Low-Grade Wood. *Lesnoy vestnik* = Forest Bulletin, 2011, no. 5, pp. 93–97. (In Russ.).

4. Огурцов В.В., Каргина Е.В., Матвеева И.С. Зависимость объемного выхода пиломатериалов от дробности сортировки бревен по толщине // Хвойные бореальной зоны. 2013. № 5-6. С. 71–75.

Ogurtsov V.V., Kargina E.V., Matveeva I.S. Dependence of the Lumber Volume Output and Their Production Profitability on Divisibility of Log Thickness Sorting Concerning Its Curvature. *Khvoynyye boreal'noy zony* = Conifers of the Boreal Area, 2013, no. 5-6, pp. 71–75. (In Russ.).

5. Олдрин В.М. Метод морфологического анализа технических систем. М.: ВНИИПИ, 1989. 312 с.

Oldrin V.M. *Method of Morphological Analysis of Technical Systems*. Moscow, All-Russian Scientific Research Institute of Patent Information Publ., 1989. 312 p. (In Russ.).

6. Патент № 2654720 С1 РФ, МПК В27В 1/00. Способ получения конструкционной пилопродукции из круглых лесоматериалов, имеющих сердцевинную гниль: № 2017131378: заявл. 6.09.2017: опубл. 22.05.2018 / В.Е. Бызов, А.С. Торопов, С.А. Торопов.

Toropov A.S., Mikryukova E.V., Sharapov E.S., Toropov S.A., Byzov V.E., Sedykh M.A. *Method for Obtaining Structural Lumber from Round Timber with Heartwood Rot*. Patent RF, no. RU 2654720 C1, 2018. (In Russ.).

7. Прокофьев Г.Ф. Интенсификация пиления древесины на лесопильных рамах и ленточнопильных станках // Деревообраб. пром-сть. 1990. № 9. С. 6–10.
- Prokofyev G.F. Intensification of Wood Sawing on Frame Headrig Sawing Lines and Band Saws. *Derevoobrabativalnaya promishlennost'*, 1990, no. 9, pp. 6–10. (In Russ.).
8. Прокофьев Г.Ф., Дундин Н.И. Основные направления интенсификации переработки древесины на лесопильном оборудовании // Изв. вузов. Лесн. журн. 2004. № 3. С. 65–72.
- Prokofyev G.F., Dundin N.I. The Main Directions of Intensification of Wood Processing on Sawmill Equipment. *Lesnoy Zhurnal* = Russian Forestry Journal, 2004, no. 3, pp. 65–72. (In Russ.). <http://lesnoizhurnal.ru/upload/iblock/91b/91b43ab31325ae20895d-468653c1a204.pdf>
9. Стукач О.В. Программный комплекс Statistica в решении задач управления качеством. Томск: ТПУ, 2011. 163 с.
- Stukach O.V. *The Software Package "Statistica" in Solving Quality Management Problems*. Tomsk, Tomsk Polytechnic University Publ., 2011. 163 p. (In Russ.).
10. Торопов А.С. Исследование предмета труда лесозаготовки. Йошкар-Ола: МарГТУ, 1995. 16 с.
- Toropov A.S. *Study on the Subject of Forestry Exploitation Labor: Laboratory Operational Manual*. Yoshkar-Ola, MarGTU Publ., 1995. 16 p. (In Russ.).
11. Торопов А.С., Торопов С.А., Микрюкова Е.В. Исследование пораженности древесины напеченной гнилью // Изв. вузов. Лесн. журн. 2009. № 4. С. 95–100.
- Toropov A.S., Toropov S.A., Mikryukova E.V. Investigation of Wood Affected by Stump Rot. *Lesnoy Zhurnal* = Russian Forestry Journal, 2009, no. 4, pp. 95–100. (In Russ.). <http://lesnoizhurnal.ru/upload/iblock/eb2/eb2a4ad3da8cb6509a4164b19962c3e3.pdf>
12. Baltrušaitis A., Pranckevičienė V. The Influence of Log Offset on Sawn Timber Volume Yield. *Materials Science*, 2005, vol. 11, no. 4, pp. 403–406.
13. Ikonen V.P., Kellomäki S., Peltola H. Linking Tree Stem Properties of Scots Pine (*Pinus sylvestris* L.) to Sawn Timber Properties Through Simulated Sawing. *Forest Ecology and Management*, 2003, vol. 174, no. 1-3, pp. 251–263. [https://doi.org/10.1016/S0378-1127\(02\)00035-X](https://doi.org/10.1016/S0378-1127(02)00035-X)
14. Koch P. *Wood Machining Processes*. New York, Ronald Press Co. Publ., 1964. 530 p.
15. Kollman F., Cote W.A.Jr. *Principles of Wood Science and Technology: Solid Wood*. Berlin Heidelberg, Springer Publ., 1968. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-87928-9>
16. Orłowski K.A., Chuchala D., Szczepanski M., Migda W., Wojnicz W., Sandak J. Lateral Forces Determine Dimensional Accuracy of the Narrow-Kerf Sawing of Wood. *Scientific Reports*, 2022, vol. 12, no. 1, p. 86. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-04129-3>
17. Parra Galvez J.L.A., Borenstein D., da Silveira Farias E. Application of Optimization for Solving a Sawing Stock Problem with a Cant Sawing Pattern. *Optimization Letters*, 2018, vol. 12, no. 8, pp. 1755–1772. <https://doi.org/10.1007/s11590-017-1178-x>
18. Ross R.J., Brashaw B.K., Wang X., White R.H., Pellerin R.F. *Wood and Timber Condition Assessment Manual*. Madison, WI: Forest Products Society Publ., 2004. 74 p.
19. Sandberg D. Value Activation: A Concept for New Applied Processing Technology Star-Sawing Technique. *Proceedings of the International Conference on Value-Added Wood Processing, Nov. 13–14, 1997*. Vancouver, BC Canada, 1997, pp. 1–10.
20. Sandberg D. Radially Sawn Timber – the Primwood Method for Improved Properties. *European Journal of Wood and Wood Products*, 2005, vol. 63, no. 2, pp. 94–101. <http://dx.doi.org/10.1007/s00107-004-0531-9>

21. Shanin I.I. Definition of Factors Influencing Innovative Development of Enterprises of Timber Processing Complex. *Proceedings of the International Conference "Economy in the Modern World" (ICEMW 2018)*. Atlantis Press, 2018, pp. 205–209. <https://doi.org/10.2991/icemw-18.2018.38>
22. Shenga P.Ah., Bomark P., Broman O., Sandberg D. Log Sawing Positioning Optimization and Log Bucking of Tropical Hardwood Species to Increase the Volume Yield. *Wood Material Science and Engineering*, 2017, vol. 12, no. 4, pp. 257–262. <https://doi.org/10.1080/17480272.2016.1275788>
23. Szczawinski M., Biernacka J. Valuation of Experimental Sawing of Low-Grade Pine Logs (WCO). *Engineering*, 2010. pp.127–130.
24. Todoroki Chr., Rönqvist M. Log Sawing Optimization Directed by Market Demands. *NZ Journal of Forestry*, February, 2001, pp. 29–33.
25. Todoroki Chr., Rönqvist M. Dynamic Control of Timber Production at a Sawmill with Log Sawing Optimization. *Scandinavian Journal of Forest Research*, 2002, vol. 17, no. 1, pp. 79–89. <https://doi.org/10.1080/028275802317221118>
26. Yerbury M.D., Cooper R.J. Curve Sawing Spruce Sawlogs Containing Sweep Can Reduce Drying Distortion When Compared with Conventional Sawing. *Forestry*, England, London, 2010, vol. 83, no. 4, pp. 443–450. <https://doi.org/10.1093/forestry/cpq026>

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