

Оригинальная статья

DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2025.1/10>

УДК 676.051.214



Графо-аналитическое моделирование дискретно-непрерывных поточных линий лесопромышленных складов

Ирина М. Еналеева-Бандура¹, melnikov1978@inbox.ru, <https://orcid.org/0000-0001-7032-9512>

Дмитрий В. Лозовой¹, dvl92@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0009-8414-8355>

Даниил Ю. Литвинов¹, chess96@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0008-8266-4092>

Александр Н. Баранов¹, aleksandr-baranov-55@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-1333-6285>

Владимир А. Морковин², morkovin-vladimir@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-7613-3641>

Ольга А. Куницкая³, ola.ola07@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-8542-9380>

¹ ФГБОУ ВО «Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М.Ф. Решетнева», просп. им. газеты «Красноярский рабочий», 31, г. Красноярск, 660037, Российская Федерация

² ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова», ул. Тимирязева, 8, г. Воронеж, 394087, Российская Федерация

³ ФГБОУ ВО «Арктический государственный агротехнологический университет», шоссе Сергеляхское, 3 км, 3, г. Якутск, 677007, Российская Федерация

В данной статье рассматривается разработка графо-аналитического метода моделирования технологических процессов дискретно-непрерывных поточных линий лесопромышленных складов. Предложенный подход основан на матричных преобразованиях координат и позволяет аналитически описывать структуру технологических операций с визуализацией в виде графиков зависимости перемещений от времени. Авторами выделены два ключевых способа моделирования: суммирование векторов перемещений и суммирование частных значений времени, из которых первый является более эффективным для продольной подачи древесного сырья. Работа акцентирует внимание на текущих проблемах проектирования поточных линий, исторически сложившихся методах, а также преимуществах графо-аналитического подхода над традиционными способами. Целью исследования является разработка структурированного метода моделирования технологических процессов для совершенствования проектирования и оптимизации поточных линий лесопромышленных складов. Методы исследования включают теоретическое моделирование, аналитическое описание процессов на основе матричных преобразований и графическое отображение результатов. Результаты: Предложен новый метод моделирования, который позволяет упрощать процесс проектирования складской инфраструктуры и повышать его точность. Методика демонстрирует свою эффективность при моделировании работы продольных линий подачи древесного сырья. Область применения: Разработанный подход ориентирован на использование в лесной промышленности, однако он может быть адаптирован и для других отраслей с аналогичными технологическими задачами. Заключение: Представленный метод моделирования позволяет оптимизировать проектирование поточных линий, сокращая время и финансовые затраты на экспериментальные разработки. Работа имеет научную и практическую значимость для развития понятия комплексного использования лесных ресурсов. Работа выполнена в рамках научной школы «Инновационные разработки в области лесозаготовительной промышленности и лесного хозяйства».

Ключевые слова: графо-аналитическое моделирование, матричные преобразования, лесопромышленные склады, дискретно-непрерывные процессы, поточные линии.

Финансирование: часть материалов исследования получена за счет гранта Российского научного фонда № 23-16-00092, <https://rscf.ru/project/23-16-00092/>.

Благодарности: авторы благодарят рецензентов за вклад в экспертную оценку статьи.

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования: Еналеева-Бандура И.М. Графо – аналитическое моделирование дискретно – непрерывных поточных линий лесопромышленных складов / И.А. Еналеева-Бандура, Д.В. Лозовой, Д.Ю. Литвинов,

А.Н. Баранов, В.А. Морковин, О.А. Куницкая// Лесотехнический журнал. – 2025. – Т. 15. – № 1 (57). – С. 154-166. – Библиогр.: с. 162-165 (23 назв.). – DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2025.1/10>

Поступила 28.12.2024. *Пересмотрена* 23.02.2025. *Принята* 11.03.2025. *Опубликована онлайн* 24.03.2025

Article

Grapho-analytical modeling of discrete-continuous production lines of timber warehouses

Irina M. Enaleeva-Bandura¹, melnikov1978@inbox.ru,  <https://orcid.org/0000-0001-7032-9512>

Dmitry V. Lozovoy¹, dvl92@mail.ru,  <https://orcid.org/0009-0009-8414-8355>

Daniel Yu. Litvinov¹, chess96@mail.ru,  <https://orcid.org/0009-0008-8266-4092>

Alexander N. Baranov¹, aleksandr-baranov-55@mail.ru,  <https://orcid.org/0000-0003-1333-6285>

Vladimir A. Morkovin²,  morkovin-vladimir@mail.ru,  <https://orcid.org/0000-0003-5822-2254>

Olga A. Kunitskaya³, ola.ola07@mail.ru,  <https://orcid.org/0000-0001-8542-9380>

¹ *Siberian State University of Science and Technology named after Academician M. F. Reshetnev, Krasnoyarsk, Krasnoyarsk Worker newspaper ave., 31, Russian Federation*

² *Voronezh State Forestry Engineering University named after G.F. Morozov, 8 Timiryazeva str., Voronezh, Voronezh Region, Russian Federation*

³ *Arctic State Agrotechnological University, Russia, Yakutsk, Sergelyakhskoe highway, 3 km, d 3, Republic of Sakha (Yakutia), Russian Federation*

Abstract

This article discusses the development of a grapho-analytical method for modeling technological processes of discrete-continuous production lines of timber warehouses. The proposed approach is based on matrix transformations of coordinates and allows us to analytically describe the structure of technological operations with visualization in the form of graphs of displacement versus time. The authors have identified two key modeling methods: summation of displacement vectors and summation of particular time values, of which the first is more effective for longitudinal feeding of wood raw materials. The work focuses on the current problems of production line design, historically established methods, as well as the advantages of the grapho-analytical approach over traditional methods. The purpose of the research is to develop a structured method for modeling technological processes to improve the design and optimization of production lines of timber warehouses. The research methods include theoretical modeling, analytical description of processes based on matrix transformations and graphical representation of the results. Results: A new modeling method is proposed that makes it possible to simplify the process of designing warehouse infrastructure and increase its accuracy. The technique demonstrates its effectiveness in modeling the operation of longitudinal feed lines for wood raw materials. Scope of application: The developed approach is focused on use in the forestry industry, but it can be adapted to other industries with similar technological challenges. Conclusion: The presented modeling method makes it possible to optimize the design of production lines, reducing the time and financial costs of experimental development. The work has scientific and practical significance for the development of the concept of integrated use of forest resources. The work was carried out within the framework of the scientific school "Innovative developments in the field of logging industry and forestry".

Keywords: graph-analytical modeling, matrix transformations, timber warehouses, discrete-continuous processes, production lines.

Funding: some of the research materials were obtained through a grant from the Russian Science Foundation No. 23-16-00092, <https://rscf.ru/project/23-16-00092/>.

Acknowledgments: authors thanks the reviewers for their contribution to the peer review.

Conflict of interest: the authors declares no conflict of interest.

For citation: Enaleeva-Bandura I.M., Lozovoy D.V, Litvinov D.Y., Baranov A.N., Morkovin V.A., Kunitskaya O.A. (2025) Grapho-analytical modeling of discrete continuous production lines of timber warehouses. *Forestry Engineering journal*, Vol. 15. No. 1 (57), pp. 154-166 (in Russian). DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2025.1/10>

Received 28.12.2024. **Revised** 23.02.2025. **Accepted** 11.03.2025. **Published online** 24.03.2025

Введение

Во времена СССР в нашей стране доминировала хлыстовая заготовка древесины, которая предусматривала вывозку с лесосек на лесопромышленные склады древесного сырья в виде хлыстов, реже деревьев, или полухлыстов. Также была разработана технология заготовки и вывозки древесного сырья в виде полудеревьев, но в производственный процесс лесозаготовительных предприятий она не была внедрена [1, 2].

После крушения СССР отечественное лесное машиностроение, ориентированное на выпуск лесных машин для хлыстовой заготовки древесины – валочно-трелевочных, валочно-пакетирующих, также было развалено. На лесозаготовительных предприятиях России начали доминировать системы машин для сортиментной заготовки древесины, прежде всего харвестеры и форвардеры, реже встречаются форвестеры и харвардеры, валочно-трелевочно-процессорные машины [3]. На ряде крупных предприятий Сибири сортименты получают на верхних складах, при помощи процессоров.

Доминирование сортиментной заготовки привело к тому, что такой вид лесопромышленных складов как нижние склады лесозаготовительных предприятий также стали редкостью. Ведь именно на них ранее производили первичную обработку заготовленного древесного сырья – раскряжевку и сортировку, реже обрезку сучьев, раскряжевку и сортировку [4].

С одной стороны, сортиментная древесины заготовка доминирует во всем мире. Она позволяет, отказавшись от промежуточных (нижних) лесопромышленных складов, доставлять сортименты различных групп сортировки – породы, размеров, качества, назначения, непосредственно на биржи сырья потребителей, или лесоперевалочные базы.

С другой стороны, производство сортиментов на лесосеке, при котором очистка деревьев от сучьев, раскряжевка и сортировка выполняются машинами и оборудованием с двигателями внутреннего сгорания (ДВС) повышает энергоемкость технологического процесса лесосечных работ, поскольку КПД ДВС значительно ниже, чем у электродвигателей привода стационарных сучкорезных, раскряжевочных, сучкорезно-раскряжевочных установок, и сортировочных транспортеров [5].

Кроме того, оптимальность раскряга при раскряжке на лесосеке значительно меньше, чем при раскряжке на стационарных раскряжевочных установках лесопромышленных складов, что заметно снижает процент выхода деловой древесины в целом, а также процент выхода целевых сортиментов [6].

Поэтому можно в настоящее время наблюдать процессы отказа крупных лесопромышленных предприятий Сибири, имеющих возможность осуществлять транспортировку заготовленных хлыстов по собственным лесовозным дорогам, или водным транспортом, в плотках, от сортиментной заготовки и возврата к хлыстовой. При этом их собственные лесопромышленные склады оснащаются импортными (из недружественных стран) раскряжевно-сортировочными линиями.

Несмотря на то, что вывозить заготовленную древесину из леса в виде деревьев с кроной не выгодно ввиду малого коэффициента полндревесности ввоза, по мере развития технологий переработки кроновой части деревьев с получением востребованной, высокомаржинальной продукции, и подорожанием древесного сырья в целом, этот вариант технологического процесса лесосечных работ также начинает становиться востребованным, вкуче с апробациями технологии заготовки полудеревьями, при которой комлевая и срединная часть хлыста, в виде делового

долготья вывозятся на нижние лесопромышленные склады отдельно, а вершинная часть дерева с кроной отдельно. При этом для повышения коэффициента полндревесности веза последних можно обеспечить их принудительное уплотнение при погрузке и перевозке [7].

Следовательно, при рассмотрении вариантов возрождения в России производства агрегатов поточных линий нижних лесопромышленных складов от идеи стационарных сучкорезных, или сучкорезно-раскряжевочных установок отказываться рано.

Первичная обработка древесного сырья в виде хлыстов, полухлыстов, деревьев на лесопромышленных складах осуществляется, обычно, на линиях с продольной подачей, с последовательным или смешанным агрегатированием под раскряжевочную пилу, система ИНС. Или с поперечной подачей - с поперечным надвиганием на постав дисковых пил (раскряжевочные установки типа слешер, триммер), система ЗНС. Также были разработаны и ограничено внедрены на крупных лесопромышленных складах линии, предусматривающие групповую (пачковую) обработку деревьев или хлыстов, система ЗНС, на установках типа МСГ-3, МСГ-3.1, ЛО-62 [4, 6, 8, 9]. Выбор типа раскряжевочной поточной линии зависит от годового грузооборота конкретного предприятия. Очевидно, что новые условия применения цифровой автоматизации требуют создания нового поколения раскряжевочных поточных линий, которые будут отвечать требованиям по ресурсосбережению, производительности, энергоемкости и др. Изучение литературных источников показало, что оборудование для первичной обработки древесного сырья на лесопромышленных складах в Российской Федерации в настоящее время серийно не выпускается. Изготавливается мелкосерийное оборудование без учета региональных условий арендных баз, например, таксационных и качественных характеристик произрастающих на них древостоев [10, 11]. В то время как до девяностых годов XX века в нашей стране выпускались поточные линии с продольной подачей типа хлыста, включавшие в себя стационарные сучкорезные, раскряжевочные, сучкорезно-раскряжевочные установки,

ПСЛ-2А, ЛО-15С, ЛО-30, и др. конструкция которых учитывала региональные особенности как климатические (линии в северном исполнении), так и таксационные - по крупности и качеству древесного сырья. Естественно, возобновлять выпуск морально устаревшего оборудования не рационально, необходимо совершенствовать конструкции агрегатов и оборудования, входящих в структуры различных поточных линий. Необходимо разработать метод моделирования поточных линий с последовательным размещением оборудования и агрегатов в количестве более двух, что позволит внедрять оборудование с минимальным количеством доработок. Именно такую последовательность структуры поточных линий современные методы моделирования не решают [4, 12]. Моделирование ведется методом циклограмм при очень слабой формализации технологического процесса [12]. Многие критерии оценки можно получить только экспериментальным путем, что очень дорого. Существующие методы моделирования поточных технологий на основе теории массового обслуживания, PDE метода (описание процесса уравнениями в частных производных [13, 14], вероятностные методы, не решают проблему, поскольку также приводят в лучшем случае к циклограммам (учитывают) два параметра (время и безразмерную величину). То есть, даже наиболее совершенный метод решения проблемы PDE [12-15] решает задачу в двухмерной области. Решение сводится к циклограммам в формате 2D [15]. Изложенный ниже метод матричных преобразований координат решает проблему поточных технологий с последовательно установленным оборудованием более двух единиц в формате 4D плюс. То есть, метод позволяет учитывать структуру поточной линии при последовательных или одновременных перемещениях по координатным осям X, Y, Z с учетом частных значений времени перемещений по отдельным агрегатам. Для этого применяются матрицы 5×5 [16]. При этом имеется возможность учитывать любую операцию, на любом станке (установке, агрегате), если имеются затраты времени на выполнение операции.

Цель данной работы: разработать метод моделирования работы оборудования поточных линий лесопромышленных складов, дающий возможность

варьировать факторами изменчивости параметров предмета труда, скорости перемещения, времени работы инструмента с немедленным получением отклика моделирующей системы на следующей последовательности обработки предмета труда, а также определять степень совмещенности операций и задержек.

Объекты и методы исследования

Технологические операции на поточных линиях лесопромышленных складов выполняются в строгой последовательности непрерывно или непрерывно–циклически в зависимости от характера операции обработки. В первом случае поступление сырья и выход готовой продукции (полуфабриката) осуществляется непрерывно с коррекцией режимов выполнения операций в автоматическом режиме управления поточной линией [4]. Во втором случае при выполнении ряда операций в какой-то момент общего цикла производится ряд операций без перемещения предмета труда, например, раскряжевка на сортименты. Или выполняется операция сбрасывания предмета труда. В этих случаях также имеется возможность учесть затраты времени. Нами разработаны два метода графического решения. Первый метод - суммирование векторов перемещений, который больше подходит для поточных линий с продольной подачей хлыстов, или деревьев. Второй – метод суммирования частных значений времени по операционно – метод для поточных линий с поперечной подачей. Рассмотрим графический метод моделирования технологического процесса для поточных линий с продольной подачей в непрерывном режиме.

Для примера произведем описание упрощенной поточной системы - сучкорезной установки, состоящей из трех видов оборудования, которые выполняют следующие операции:

- А - разобшение пакета деревьев;
- В – протаскивание сучковой зоны;
- С – удаление древесного хлыста.

Структуру процесса опишем графом - А, В, С - вершины графа (рисунок 1), - l_1, l_2, l_3 ребра графа; D - операция складирования.

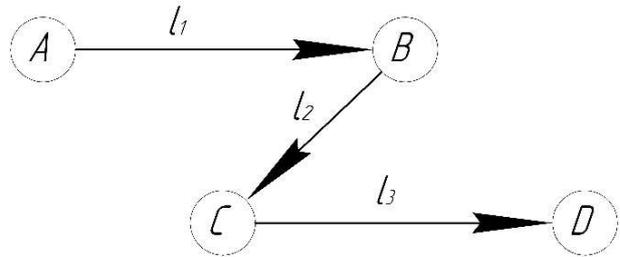


Рисунок 1. Граф технологического процесса
Figure 1. Graph of the technological process

В соответствии с рисунком 2 произведем моделирование технологического процесса последовательно установленного оборудования поточной линии, состоящей из трех агрегатов:

- Разобщик пакета деревьев (вектор l_1);
- протаскивающая каретка для обрезки сучьев (вектор l_2);
- агрегат удаления древесных хлыстов (вектор l_3).

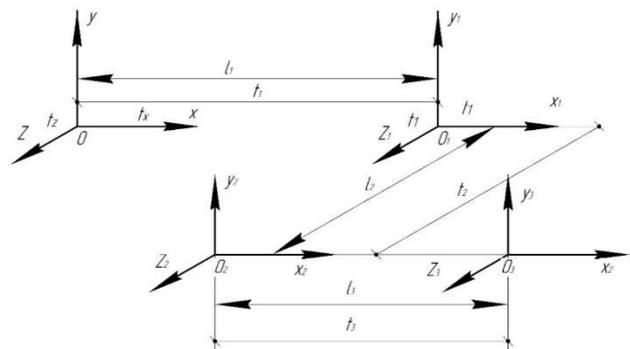


Рисунок 2. Матричные преобразования координат: OXYZ - базовая система координат присваивается предмету труда, поступившему на операцию разобшения пакета; $O_1 X_1 Y_1 Z_1, O_2 X_2 Y_2 Z_2, O_3 X_3 Y_3 Z_3$ – координатные системы соответствующие операциям разобшения пакета деревьев, протаскивания сучковой зоны, удаления древесного хлыста; l_1, l_2, l_3 модули векторов перемещений при разобшении пакета деревьев, протаскивании сучковой зоны деревьев, удаления из зоны обработки соответственно; t_1, t_2, t_3 частные значения времени выполнения операций разобшения, протаскивания, удаления l_1, l_2, l_3 соответственно

Figure 2. Matrix transformations of coordinates: OXYZ - the basic coordinate system is assigned to the object of labor received for the package separation op-

eration; $O_1 X_1 Y_1 Z_1$, $O_2 X_2 Y_2 Z_2$, $O_3 X_3 Y_3 Z_3$ – coordinate systems corresponding to the operations of separating a package of trees, dragging a knot zone, removing a tree whip; l_1, l_2, l_3 modules of displacement vectors when disconnecting a package of trees, dragging the knot zone of trees, removal from the processing zone, respectively; t_1, t_2, t_3 are particular values of the execution time of the operations of separation, dragging, deletion l_1, l_2, l_3 , respectively

На рис. 1 видно, что в основе модели лежит суммирование векторов $|\vec{l}_1|, |\vec{l}_2|, |\vec{l}_3|$. Сумма модулей векторов $|\vec{l}_1| + |\vec{l}_2| + |\vec{l}_3| = \sum_i^n l_i$ соответствует итоговому перемещению предмета труда относительно плавающей базовой системы координат OXYZ. Каждому перемещению в процессе обработки дерева соответствует частное значение времени t_1, t_2, t_3 , которое при выполнении операции одинаково для перемещений в направлении любой координатной оси, то есть время изменяется под каждой осью при выполнении i -той операции одинаково. Это обстоятельство позволяет поворачивать векторы на осях (рисунок 2) и переносить параллельно, поскольку преобразование координат не влияет на параметры векторов [17, 18], а частное значение времени протекания операции одинаково по каждой оси координат.

Каждой координатной системе $O_1 X_1 Y_1 Z_1$, $O_2 X_2 Y_2 Z_2$, $O_3 X_3 Y_3 Z_3$ (рисунок 2) соответствует переходная ортогональная единичная квадратная матрица 5×5 [31, 32]

$$M_0 = m_0(\vec{i}, \vec{j}, \vec{k}; 0, 0, 0) \times m_1(\vec{i}, t_1, |\vec{l}_1|, t_1) \times m_2(\vec{j}, t_2, |\vec{l}_2|, t_2) \times m_3(\vec{k}, t_3, |\vec{l}_3|, t_3).$$

В сокращенной записи [31, 32]. В развернутой форме сумма перемещений по трем координатам будет иметь следующий вид:

$$M_3 = m_1(\vec{i}, t_1, l_1) \times m_2(\vec{k}, t_2, l_2, t_2) \times m_3(\vec{i}, t_3, l_3, t_3)$$

$$M_3 = \begin{vmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & l_1 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & t_1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{vmatrix} \times \begin{vmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & l_2 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & t_2 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{vmatrix} \times \begin{vmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & l_3 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & t_3 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & l_1 + l_3 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & l_2 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & t_1 + t_2 + t_3 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{vmatrix}$$

Результирующая матрица M_3 указывает на координаты предмета труда относительно плавающей системы координат OXYZ (рисунок 2), также дает суммарный результат по затраченному времени на технологический процесс, то есть сформирована единая ось времени, которая состоит из суммы частных значений времени, затрачиваемых на операции. Таким образом матрица 5×5 имеет графическое соответствие – это вектор, например, \vec{l}_1 , исходящий из начала координат системы $O_1 X_1 Y_1 Z_1$. Координаты вектора $x=l_1, y=0, z=0$, время перемещения или выполнения операции равно t_1 . Ось частного значения времени t_1 также исходит из начала координат и имеет положительное значение. Для синтеза модели необходимы следующие параметры: скорости перемещения, расстояния перемещений, частное время перемещений предмета труда на каждом из агрегатов. Эти параметры можно определить тремя путями [19]:

- исходя из необходимой производительности поточной линии определяется цикл $t_{ц}$ ведущего агрегата;
- решается задача определения параметров агрегатов идеальной поточной линии при помощи матриц 4×4 [20];
- назначаются параметры оборудования поточной последовательности по аналогии с апробированными и надежными агрегатами в промышленном исполнении.

Результаты и их обсуждение

Проведем анализ работы модели на конкретном примере. Назначим параметры трех-агрегатной поточной линии при одинаковых частных значениях времени t_i , что позволит синтезировать идеальную модель [21] технологического процесса. Идеальная модель не имеет задержек и остановок непрерывного потока предмета труда, циклы станков равны циклу задающего механизма. Главная задача моделирования поточных технологий заключается в изучении технологического процесса при совмещении операций, то есть, моделируется работа поточных линий с последовательно установленным оборудованием в количестве больше двух в непрерывном режиме.

Проследим выполнение условия совмещения операций на модели сучкорезной установки рисунок

3. От нулевой точки оси времени начинается график перемещения дерева при разобшении – вектор $l_1 = 1,6$ м. (Iст - Iхл). На восьмой секунде (масштаб: в пяти мм одна секунда) происходит переход от операции разобщения к операции протаскивания. Переход мгновенный. Все сопутствующие переходные процессы по умолчанию укладываются в интервал восьми секунд.

Суммируем векторы l_1, l_2, l_3 по правилам векторной алгебры и используем возможность параллельного переноса вектора на величину равную частному значению времени, в результате получаем график зависимости перемещений от времени по каждой операции.

Далее начинается процесс протаскивания дерева через сучкорезную головку $l_2 = 3$ м, $t_2 = 8$ с. (IIст. – IIхл) Одновременно с этим начинается разобщение пакета деревьев (IIхл- Iст), которое заканчивается одновременно с процессом протаскивания. Процесс протаскивания (Iхл – IIст) заканчивается переходом на станок (IIIст), который удаляет хлыст из зоны обрезки сучьев (Iхл -IIIст) и т.д.

Дальнейший анализ сводится к определению совмещённых операций следующим образом (рисунок 3): проводим мысленно сечение в виде вертикальной черты по первому графику зависимости перемещений от времени на третьей секунде протекающего технологического процесса (рисунок 3). В сечении попал только график первого станка (Iст). Из точки пересечения наклонной линии графика (проводим горизонтальную линию до пересечения вектора l_1 . Общая длина пути 3 м, за три секунды предмет труда прошел один метр (масштаб: пяти мм на рисунке соответствует 1 м), то есть получаем информацию, где находится первый предмет труда.

Сделаем сечение на десятой секунде: второй хлыст (Iст - IIхл) при разобщении прошел 0,8 метра, первый хлыст (Iхл-IIст) находится в процессе обрезки сучьев (обрезано по длине сучковой зоны 1,5 м.). Сечение на двадцатой секунде – третий хлыст (Iст-IIIхл) в процессе разобщения прошел 1,5 м; со второго хлыста обрезано сучьев на длине 3 м; первый хлыст (Iхл-IIIст) находится в процессе удаления хлыста из зоны обрезки сучьев и находится от зоны на расстоянии 2 м. Далее, на тридцатой секунде по-

лучим следующую информацию: четвертый предмет труда находится в процессе разобщения и прошел 2,2 м; на третьем дереве обрезано сучьев на длине 4,3 м. Второй хлыст находится на расстоянии 3 м от зоны обрезки сучьев. Цикл обработки одного хлыста равен $t_{ц} = 24$ с.

На рисунке 4 приведена графическая модель поточной линии аналогичной, рассмотренной выше, но с буферным магазином после разобщителя. Магазин поставлен для упрощения модели. Поскольку цикл разобщителя намного меньше, чем циклы последующих операций и при моделировании модель будет перегружена для восприятия. На рисунке 4 с буферным магазином задержки происходят только для второго станка, что облегчает анализ в демонстрационных целях.

Проведем анализ по сечениям: сечение М- М Третий хлыст в процессе разобщения прошел путь в пределах 1,75 м на 16 секунде. Второй хлыст прошел 1,75 м при протаскивании на 16 секунде работы линии. Сечение N-N на 24 секунде. Четвертый хлыст прошел двухметровый путь. Третий хлыст также прошел 2 м пути протаскивания. Первый хлыст находится на 2,5 м от точки перехода при удалении первого хлыста. Завершится переход удаления первого хлыста на 27 с, то есть второй хлыст необходимо задержать на 1,5 с чтобы перейти на агрегат удаления хлыста из зоны обработки. Далее видно, что третий хлыст надо задержать на 3 с, четвертый хлыст на 4 с и т.д. по нарастающей. То есть в какой-то момент необходимо будет скорректировать скоростные характеристики станков с целью исключения простоев одного или двух агрегатов.

Дальнейший анализ показывает (рис. 2), что рассмотренный метод моделирования определяет три параметра перемещений по трем координатам X, Y, Z с учетом частных значений времени, затрачиваемого на перемещения или другие технологические операции, которые можно учесть по затратам времени. Плюс к четырем параметрам - определение скорости как тангенс угла (φ) между осью времени и диагональю треугольника графика зависимости перемещений от времени (рис. 4).

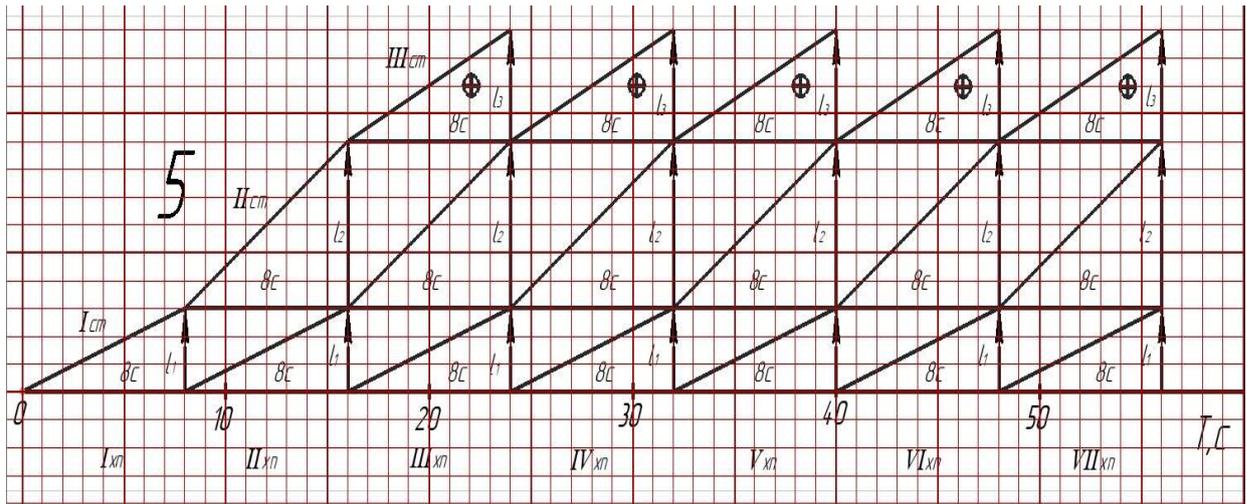


Рисунок 3. Матричная графическая модель идеальной поточной линии для обрезки сучьев (аналитическая запись структуры):

$l_1 = 3\text{м}, t_1 = 8\text{с.}$ (разобшитель пакетов деревьев); $l_2 = 6\text{м}, t_2 = 8\text{с.}$ (протаскивание сучковой зоны дерева); $l_3 = 4\text{м}, t_3 = 8\text{с.}$ (удаление древесного хлыста из зоны обрезки сучьев). $t_1 = t_2 = t_3 = t_{ц}$; Iст, IIст, IIIст – первый станок, второй станок, третий станок соответственно. I хл, II хл и т.д. – первый хлыст, второй хлыст и т.д.; Т с – ось времени, секунды

Figure 3. Matrix graphical model of an ideal production line for cutting branches (analytical record of the structure):

$l_1=3\text{m}, t_1=8\text{s.}$ (tree packet disconnecter); $l_2=6\text{m}, t_2=8\text{s.}$ (dragging the knot zone of the tree); $l_3=4\text{m}, t_3=8\text{s.}$ (removing the wood whip from the branch pruning area). $t_1=t_2=t_3=t_{ц}$; Iст, IIст, IIIст – the first machine, the second machine, the third machine, respectively. I хл, II хл, etc. – the first whip, the second whip, etc.; Т с - is the time axis, seconds

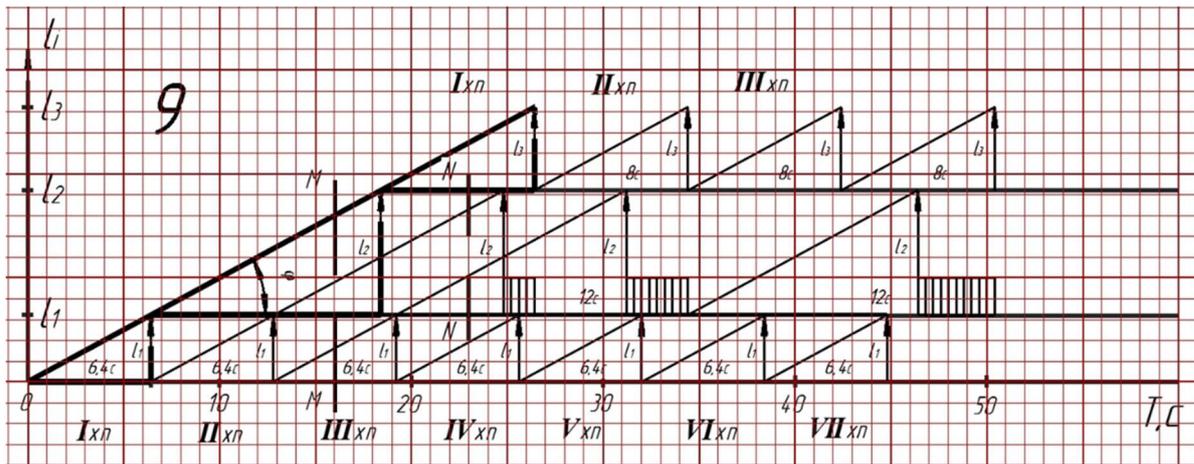


Рисунок 4. Матричная модель трех-агрегатной поточной линии для обрезки сучьев в графическом исполнении с параметрами по аналогам:

$l_1 = 1,6\text{м}, t_1 = 6,4\text{с.}$ (разобшитель пакетов деревьев); $l_2 = 3\text{м}, t_2 = 12\text{с.}$ (протаскивание сучковой зоны) $l_3 = 2\text{м}, t_3 = 8\text{с}$ агрегат удаления хлыста из зоны обрезки сучьев.; φ - угол наклона графика зависимости перемещений от времени

Figure 4. Matrix model of a three-unit production line for pruning branches in graphical design with analog parameters: $l_1=1,6\text{m}, t_1=6.4\text{s.}$ (disconnecter of tree packages); $l_2=3\text{m}, t_2=12\text{s.}$ (dragging the knot zone); $l_3=2\text{m}, t_3=8\text{s}$ the unit for removing the whip from the area of pruning branches.; φ - is the angle of inclination of the graph of the dependence of movements on time

Тангенс угла φ равен скорости перемещения предмета труда на данном агрегате. Рассмотренный способ моделирования «суммированием векторов» матричного метода моделирования в большей степени подходит для дискретно – циклических поточных линий (продольная подача хлыстов), поскольку расстояния перемещений (векторы) совпадают с размерными характеристиками предмета труда (хлыстов) и продукта труда (сортиментов). Эта особенность позволяет в большей степени учитывать требования по оптимизации раскроя древесного сырья. В дальнейшем в теоретических разработках следует рассмотреть варианты моделирования технологического процесса дискретно – непрерывного и дискретно – циклического типа с размещением графиков зависимости на оси времени.

Заключение

Новый метод моделирования с применением матричных преобразований координат решает проблему моделирования поточных технологий в формате 4D плюс с расширенными возможностями формализации технологического процесса в виде описания структуры матрицами 5×5 в сокращенной записи или в развернутой форме матриц. Обе формы записи достаточно информативны. Каждое оборудование, в составе поточной линии лесопромышленного склада определяется естественными параметрами, характеризующими технологический процесс – время в явном виде, направление перемещений в пространстве, скорость перемещения и все это в естественных размерных единицах. Структурный анализ, предваряющий процесс моделирования, проводится в процессе подготовки исходных данных. Каждая матрица в структурной записи технологического процесса обработки предмета труда

имеет графическое соответствие в виде графика зависимости перемещений от времени. Аналитическая и графическая части моделирования технологического процесса лесопромышленного склада позволяют учесть затраты времени любых технологических операций.

Рассмотренные в статье фрагменты графической модели для трех станков (агрегатов, установок) ограничены по числу обработанных древесных хлыстов форматом страницы. В общем случае этот фактор бесконечен. При этом имеется возможность варьировать факторами изменчивости параметров предмета труда, скорости перемещения, времени работы инструмента с немедленным получением отклика моделирующей системы на следующей последовательности обработки предмета труда. Графическая модель позволяет определять степень совмещенности операций и задержек, особенно при непрерывном методе обработки предмета труда. Разработанный метод моделирования предназначен прежде всего для разработчиков лесной техники первичной обработки и частичной переработки древесного сырья. В дальнейшем требуется дополнить созданные основы моделирования методом моделирования поточных линий с поперечной подачей.

Принципиально, предложенная методика может быть также адаптирована для использования при моделировании технологических потоков лесных терминалов – непостоянных лесопромышленных складов, типа 4НС, древесно-подготовительных цехов деревоперерабатывающих предприятий, основных лесосечных работ, лесовосстановительных работ (искусственное лесовосстановление) и выращивания посадочного материала [22, 23].

Список литературы

1. Григорьев И.В., Григорьева О.И., Никифорова А.И., Глуховский В.М. Перспективные направления развития технологических процессов лесосечных работ // Труды БГТУ. №2. Лесная и деревообрабатывающая промышленность. 2016. № 2 (184). С. 109-116.
2. Тихонов И.И., Григорьев И.В. Технологический процесс лесосечных работ при вывозке древесины полудеревьями // Материалы шестой всероссийской научно-технической конференции «Вузовская наука - региону». Вологда: ВоГТУ, 2008. - Т.1. - С.188-189.
3. Григорьева О.И., Нгуен Ф.З. Перспективная техника для проведения рубок ухода за лесом // Леса России: политика, промышленность, наука, образование. материалы научно-технической конференции. 2016. С. 112-114.

4. Пятакин В.И., Редькин А.К., Базаров С.М., Бирман А.Р., Бит Ю.А., Григорьев И.В., Шадрин А.А., Чемоданов А.Н. Технология и оборудование лесных складов и лесообрабатывающих цехов: учебник для студентов вузов, обучающихся по направлению подготовки дипломированных специалистов 656300 Технология лесозаготовительных и деревообрабатывающих производств по специальности 250401 Лесоинженерное дело / Москва, Издательство: Московский государственный университет леса - 2008. - 384 с
5. Александров И.К., Григорьев И.В., Иванов В.А., Елизаров Ю.М., Чуднов Ю.Н. Методика определения топливной экономичности бензомоторных пил // Вестник КрасГАУ. 2010. № 2 (41). С. 112-117.
6. Куницкая О.А., Тихонов И.И., Куницкая Д.Е., Григорьев И.В., Земцовский А.Е. Оптимизация процесса раскряжевки хлыстов на лесоперевалочных базах лесных холдингов при выпилровке сырья для мачтопропиточных заводов // Известия высших учебных заведений. Лесной журнал. 2014. № 3 (339). С. 86-93.
7. Тихонов И.И., Григорьев И.В., Никифорова А.И., Григорьева О.И. Лесовозный транспорт. Патент на полезную модель RU 119206 U1, 20.08.2012. Заявка № 2012120320/13 от 17.05.2012.
8. Рябухин П.Б., Григорьев И.В., Трушевский П.В., Курочкин П.А., Охлопкова М.К., Жук А.Ю. Постановка задачи поиска оптимальных параметров конструкции установки для групповой раскряжевки пачек порубочных остатков // Системы. Методы. Технологии. 2024. № 1 (61). С. 130-137.
9. Рябухин П.Б., Григорьев И.В. Определение натяжения несущего каната гибкого режущего органа в процессе работы установки для пачковой раскряжевки // Системы. Методы. Технологии. 2021. № 4 (52). С. 63-72.
10. Grigorieva O.I., Runova E.M., Tikhonov E.A., Storodubtseva T.N., Druzyanova V.P., Gerts E.F., Garus I.A., Grigorev I.V. Dynamics of the taxation characteristics of forest stands in the North-West of Russia // Polish Journal of Environmental Studies. 2022. Т. 31. № 5. С. 4107-4115.
11. Grigoreva O., Runova E., Ivanov V., Alyabyev A., Hertz E., Voronova A., Shadrina S., Grigorev I. Influence of different forest management techniques on the quality of wood // Journal of Renewable Materials. 2021. Т. 9. № 12. С. 2175-2188.
12. Сердюк А.И., Рахматуллин Р.Р., Зеленин А.П. Метод циклограмм в исследовании гибких производственных ячеек. модели и алгоритмы: монография – Оренбург: ГОУ ОГУ, 2009. – 208 с.
13. Коробецкий Ю.П., Рамазанов С.К. Имитационные модели в гибких – Луганск: Изд. ВНУ, 2003. – 280 с.
14. Пигнастый О.М. Основы статистической теории построения непрерывных моделей производственных линий // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. Математика. 2014. С. 3-12.
15. Пигнастый О.М., Заруба В.Я. Континуальное моделирование производства на поточных линиях // Мультиконференция по проблемам управления: тезисы докладов 6-ой Всероссийской научно-практической конференции (МКПУ-2013), (Дивноморье, 30 сентября-5 октября 2013 г.). - Ростов -на-Дону: Изд-во Южного федерального университета, 2013. Том. 3 - С. 157-161.
16. Denavit J., Hartenberg R.S. A Kinematic Notation for lower Pair Mechanisms Based on Matrices // Journal of Applied Mechanics, vol.22,trans.ASME,vol.77,series E.,1955, pp.215-221.
17. Акивис М.А. Тензорное исчисление –Изд –во «Наука» , 1972. – 325 с.
18. Воробьев Е.И., Попов С.А., Шевелева Г.И. Механика промышленных роботов: в 3 кн. Кн. 1. Кинематика и динамика – М.: Высш. шк., 1988. – 304 с.
19. Крейнин, Г. В. Кинематика, динамика и точность механизмов – Справочник. – М.: Машиностроение, 1984. – 224 с.
20. Лозовой, В. А. Матричное преобразование координат применительно к структурному анализу раскряжевочных линий // Лесозаготовка: межвуз. сб. научн. тр. – Красноярск: СибГТУ, 1998. С. 133-139.
21. Лозовой В.А., Никончук М.Ю., Литвинов Д.Ю. Концепция моделирования поточных технологий методом матричных преобразований координат // Хвойные бореальной зоны. 2022. Т. 40. № 6. С. 552-557.
22. Григорьев И.В., Куницкая Д.Е. Уменьшение количества отходов основного производства древесно-подготовительных цехов за счет автоматизации основных операций // Актуальные направления научных исследований XXI века: теория и практика. 2015. Т. 3. № 2-2 (13-2). С. 409-412.

23. Григорьев И.В., Григорьева О.И. Постановка задачи экономической оценки улучшения условий труда и безопасности работы операторов лесных машин // Безопасность и охрана труда в лесозаготовительном и деревообрабатывающем производствах. 2022. № 4. С. 43-48.

References

1. Grigor'ev I.V., Grigor'eva O.I., Nikiforova A.I., Gluhovskij V.M. *Perspektivnye napravleniya razvitiya tekhnologicheskikh processov lesosechnyh rabot* [Promising directions for the development of technological processes of logging operations]. Trudy BGTU= Proceedings of BSTU. Lesnaya i derevoobrabatyvayushchaya promyshlennost =Forestry and woodworking industry. 2016; 2(184):109-116. (in Rus)

2. Tihonov I.I., Grigor'ev I.V. *Tekhnologicheskij process lesosechnyh rabot pri vyvozke drevesiny poluderev'yami* [Technological process of logging operations during the removal of wood by semitrees]. Materialy shestoj vsrossijskoj nauchno-tekhnicheskoj konferencii «Vuzovskaya nauka - regionu»= Materials of the sixth All-Russian scientific and technical conference "University Science for the region". Vologda: VoGTU, 2008; 1:188-189. (in Rus)

3. Grigor'eva O.I., Nguen F.Z. *Perspektivnaya tekhnika dlya provedeniya rubok uhoda za lesom* [Promising equipment for logging and forest maintenance]. Lesa Rossii: politika, promyshlennost', nauka, obrazovanie. materialy nauchno-tekhnicheskoj konferencii= Forests of Russia: politics, industry, science, education. materials of the scientific and technical conference. 2016;112-114. (in Rus)

4. Patyakin V.I., Red'kin A.K., Bazarov S.M., Birman A.R., Bit Yu.A., Grigor'ev I.V., Shadrin A.A., Chemodanov A.N. *Tekhnologiya i oborudovanie lesnyh skladov i lesobrabatyvayushchih cekhov: uchebnik* [Technology and equipment of timber warehouses and woodworking shops: a textbook]. Moscow State University of Forests. 384 p. (in Rus)

5. Aleksandrov I.K., Grigor'ev I.V., Ivanov V.A., Elizarov Yu.M., Chudnov Yu.N. *Metodika opredeleniya toplivnoj ekonomichnosti benzomotornyh pil* [Methodology for determining the fuel efficiency of gasoline-powered saws]. Vestnik KrasGAU= Bulletin of KrasGAU. 2010; 2 (41):112-117. (in Rus)

6. Kunickaya O.A., Tihonov I.I., Kunickaya D.E., Grigor'ev I.V., Zemcovskij A.E. *Optimizaciya processa raskryazhevki hlystov na lesoperevalochnyh bazah lesnyh holdingov pri vypilovke syr'ya dlya machtopropi-tochnyh zavodov* [Optimization of the process of buckling whips at timber processing bases of forest holdings when sawing raw materials for mast-feeding plants]. Izvestiya vysshih uchebnyh zavedenij. Lesnoj zhurnal = Forest magazine. 2014; 3 (339):86-93. (in Rus)

7. Tihonov I.I., Grigor'ev I.V., Nikiforova A.I., Grigor'eva O.I. Logging transport. Utility model patent RU 119206 U1, 08/20/2012. Application No. 2012120320/13 dated 05/17/2012 (in Rus)

8. Ryabuhin P.B., Grigor'ev I.V., Trushevskij P.V., Kurochkin P.A., Ohlopokova M.K., Zhuk A.Yu. *Postanovka zadachi poiska optimal'nyh parametrov konstrukcii ustanovki dlya gruppovoj raskryazhevki pachek porubochnyh ostatkov* [Formulation of the problem of finding optimal installation design parameters for group bucking of bundles of felling residues]. Sistemy. Metody. Tekhnologii =Systems. Methods. Technologies. 2024; 1 (61):130-137.

9. Ryabuhin P.B., Grigor'ev I.V. *Opredelenie natyazheniya nesushchego kanata gibkogo rezhushchego organa v processe raboty ustanovki dlya pachkovoju raskryazhevki* [Determination of the tension of the supporting rope of a flexible cutting body during operation of a pack bucking unit]. Sistemy. Metody. Tekhnologii =Systems. Methods. Technologies. 2021; 4 (52): 63-72. (in Rus)

10. Grigorieva O.I., Runova E.M., Tikhonov E.A., Storodubtseva T.N., Druzyanova V.P., Gerts E.F., Garus I.A., Grigo-rev I.V. Dynamics of the taxation characteristics of forest stands in the North-West of Russia. Polish Journal of Environmental Studies. 2022; 31 (5): 4107-4115.

11. Grigoreva O., Runova E., Ivanov V., Alyabyev A., Hertz E., Voronova A., Shadrina S., Grigorev I. Influence of different forest management techniques on the quality of wood. Journal of Renewable Materials. 2021;9 (12):2175-2188.

12. Serdyuk A.I., Rahmatullin R.R., Zelenin A.P. The cyclogram method in the study of flexible production cells. models and algorithms: a monograph. Orenburg: GO OSU, 2009. 208 p. (in Rus)

13. Korobeckij Yu.P., Ramazanov S.K. Simulation models in flexible systems. Lugansk: VNU Publishing House, 2003. 280 p. (in Rus)

14. Pignastyj O.M. *Osnovy statisticheskoy teorii postroeniya kontinual'nykh modelej proizvodstvennykh liniy* [Fundamentals of the statistical theory of building continuous models of production lines] *Vostochno-Evropskiy zhurnal peredovykh tekhnologiy. Matematika* = East European Journal of Advanced Technologies. Mathematics. 2014; 3-12. (in Rus)
15. Pignastyj O.M., Zaruba V.Ya. *Kontinual'noe modelirovanie proizvodstva na potochnykh liniyah* [Continuous modeling of production on production lines] *Mul'tikonferenciya po problemam upravleniya: tezisy dokladov 6-oy Vserossiyskoy nauchno-prakticheskoy konferencii (MKPU-2013), (Divnomor'e, 30 sentyabrya-5 oktyabrya 2013 g.)* = Multi-conference on management problems: abstracts of the 6th All-Russian Scientific and Practical Conference (MCPU-2013), (Divnomorye, September 30-October 5, 2013). Rostov-on-Don: Publishing House Southern Federal University, 2013. 3: 157-161. (in Rus)
16. Denavit J., Hartenberg R.S. A Kinematic Notation for lower Pair Mechanisms Based on Matrices. *Journal of Applied Mechanics*. 1955; 22 (77):215-221.
17. Akivis M.A. *Tensor Calculus*. Nauka Publishing House, 1972, 325 p. (in Rus)
18. Vorob'ev E.I., Popov S.A., Sheveleva G.I. *Mechanics of industrial robots: in 3 books. Book 1. Kinematics and dynamics*. M.: Higher School, 1988. 304 p. (in Rus)
19. Kreinin, G.V. *Kinematics, dynamics and precision of mechanisms – A reference book*. Moscow: Mashinostroyeniye, 1984. 224 p. (in Rus)
20. Lozovoj, V.A. *Matrichnoe preobrazovanie koordinat primenitel'no k strukturnomu analizu raskryazhevochnykh liniy* [Matrix transformation of coordinates in relation to the structural analysis of bucking lines]. *Lesoeksplyuatsiya: mezhvuz. sb. nauchn. tr.* = Forest exploitation: interuniversity collection of scientific tr. – Krasnoyarsk: SibGTU, 1998. PP 133-139. (in Rus)
21. Lozovoj V.A., Nikonchuk M.Yu., Litvinov D.Yu. *Koncepciya modelirovaniya potochnykh tekhnologij metodom matrichnykh preobrazovaniy koordinat* [The concept of modeling flow technologies using matrix coordinate transformations]. *Hvojnye boreal'noj zony* = Conifers of the boreal zone. 2022; 40 (6): 552-557. (in Rus)
22. Grigor'ev I.V., Kunickaya D.E. *Umen'shenie kolichestva othodov osnovnogo proizvodstva drevesno-podgotovitel'nykh cekhov za schet avtomatizacii osnovnykh operacij* [Reduction of the amount of waste from the main production of wood preparation shops due to automation of basic operations] *Aktual'nye napravleniya nauchnykh issledovaniy XXI veka: teoriya i praktika* = Actual directions of scientific research of the XXI century: theory and practice. 2015; 3((2-2 (13-2)): 409-412. (in Rus)
23. Grigor'ev I.V., Grigor'eva O.I. *Postanovka zadachi ekonomicheskoy ocenki uluchsheniya uslovij truda i bezopasnosti raboty operatorov lesnykh mashin* [Setting the task of economic assessment of improving working conditions and safety of operators of forest machinery]. *Bezopasnost' i ohrana truda v lesozagotovitel'nom i derevoobrabatyvayushchem proizvodstvah* = Occupational safety and health in logging and woodworking industries. 2022; 4:43-48. (in Rus)

Сведения об авторах

Еналеева-Бандура Ирина Михайловна - доктор технических наук, доцент кафедры лесного инжиниринга, институт лесных технологий ФГБОУ ВО «Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева», г. Красноярск, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7032-9512>, e-mail: melnikov1978@inbox.ru.

Лозовой Дмитрий Владимирович - аспирант ФГБОУ ВО «Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева», г. Красноярск, ORCID: <https://orcid.org/0009-0009-8414-8355>, e-mail: dv192@mail.ru

Литвинов Даниил Юрьевич – аспирант ФГБОУ ВО «Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева», г. Красноярск, ORCID: <https://orcid.org/0009-0008-8266-4092>, e-mail: r0009-0008-8266-4092

Баранов Александр Николаевич - кандидат технических наук, доцент кафедры лесного инжиниринга, институт лесных технологий ФГБОУ ВО «Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева», г. Красноярск, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1333-6285>, e-mail: aleksandr-baranov-55@mail.ru

✉ *Морковин Владимир Александрович* – кандидат технических наук, доцент, зав. кафедрой промышленного транспорта, строительства и геодезии ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова» ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-5822-2254>, e-mail: morkovin-vladimir@mail.ru

Куницкая Ольга Анатольевна – доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Технология и оборудование лесного комплекса» ФГБОУ ВО «Арктический государственный агротехнологический университет», г. Якутск, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8542-9380>, e-mail: ola.ola07@mail.ru.

Information about the authors

Irina M. Enaleeva-Bandura - Doctor of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Forest Engineering, Institute of Forest Technologies, Siberian State University of Science and Technology named after Academician M. F. Reshetnev, Krasnoyarsk, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7032-9512>, e-mail: melnikov1978@inbox.ru.

Dmitry V. Lozovoy - postgraduate student of the Siberian State University of Science and Technology named after Academician M. F. Reshetnev, Krasnoyarsk, ORCID: <https://orcid.org/0009-0009-8414-8355>, e-mail: dvl92@mail.ru

Daniil Yu. Litvinov – postgraduate student of the Siberian State University of Science and Technology named after Academician M. F. Reshetnev, Krasnoyarsk, ORCID: <https://orcid.org/0009-0008-8266-4092>, e-mail: r0009-0008-8266-4092

Alexander N. Baranov - Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Forest Engineering, Institute of Forest Technologies, Siberian State University of Science and Technology named after Academician M. F. Reshetnev, Krasnoyarsk, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1333-6285>, e-mail: aleksandr-baranov-55@mail.ru

Vladimir A. Morkovin – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Head of the Department of Industrial Transport, Construction and Geodesy, Voronezh State Forestry University named after G.F. Morozov ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-5822-2254>, e-mail: morkovin-vladimir@mail.ru

Olga A. Kunitskaya – Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of the Department of Technology and Equipment of the Forest Complex of the Arctic State Agrotechnological University, Yakutsk, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8542-9380>, e-mail: ola.ola07@mail.ru

✉ – Для контактов/Corresponding author