

Научная статья

УДК 674.093:047

DOI: 10.37482/0536-1036-2025-6-131-141

Синхронизация технологий раскря бревен и сушки пиломатериалов

В.В. Огурцов, д-р техн. наук, проф.; *ResearcherID:* [AAZ-7418-2020](https://orcid.org/0000-0002-8995-0496),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8995-0496>

Е.В. Каргина, канд. техн. наук; *ResearcherID:* [AAZ-7109-2020](https://orcid.org/0000-0003-0158-8259),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0158-8259>

А.А. Орлов, канд. техн. наук, доц.; *ResearcherID:* [KBA-4858-2024](https://orcid.org/0000-0002-9370-7544),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9370-7544>

Д.В. Дук[✉], аспирант; *ResearcherID:* [AIF-4170-2022](https://orcid.org/0000-0001-9821-0927),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9821-0927>

Сибирский государственный университет науки и технологий им. академика М.Ф. Решетнёва, просп. им. газеты «Красноярский рабочий», д. 31, г. Красноярск, Россия, 660037; vogurtsov@mail.ru, ev_kargina@mail.ru, Orlov.tepl@mail.ru, danil.duk@yandex.ru[✉]

Поступила в редакцию 06.06.25 / Одобрена после рецензирования 13.09.25 / Принята к печати 15.09.25

Аннотация. Исследование посвящено синхронизации процессов раскря бревен и сушки пиломатериалов. Показано, что при реальном количестве сечений пиломатериалов, вырабатываемых крупно-поточным лесопильным производством за технологический период, буферные накопители сушильных штабелей досок не обеспечивают бесперебойную работу туннелей. Наблюдается либо переполнение буферных накопителей штабелями, либо их отсутствие в моменты возникновения свободных мест в туннелях. Используемые методы расчета буферных накопителей штабелей не учитывают вероятностную природу характеристик лесопильного и сушильного цехов. В них нет математического описания взаимосвязей между интенсивностью поступления штабелей сырых пиломатериалов, вместимостью буферного накопителя, а также количеством и вместимостью сушильных туннелей. Цель настоящей работы – найти закономерности накопления штабелей пиломатериалов перед сушильными туннелями и загрузки туннелей штабелями с установлением среднего времени ожидания штабелей в накопителе при различных характеристиках процессов распиловки бревен и сушки пиломатериалов. Система «накопитель штабелей – сушильные туннели» представлена как мультиканальная система массового обслуживания с параллельным функционированием каналов и ожиданием. Основными исходными показателями системы являются интенсивность поступления штабелей пиломатериалов в накопитель перед сушильными туннелями и интенсивность сушки пиломатериалов в 1 туннеле. В качестве основных выходных операционных характеристик выступают вероятность полной загрузки туннелей, среднее количество штабелей в накопителе и время нахождения штабеля в накопителе. Установлены общие закономерности процессов накопления штабелей досок и заполнения сушильных туннелей в условиях крупно-поточного производства пиломатериалов. Представлены примеры решения практических задач синхронизации лесопиления и сушки пиломатериалов. Показано, что полученные графики и математические модели позволяют решать производственные задачи: анализировать влияние породы и размеров распиливаемого сырья, структуры поставок, скоростей подачи бревнопиль-

ного оборудования, режимов работы лесопильного цеха, а также режимов сушки пиломатериалов на выбор количества туннелей и их вместимости.

Ключевые слова: распиловка, пиломатериал, накопитель, сушильный туннель, синхронизация, сушка

Для цитирования: Огурцов В.В., Каргина Е.В., Орлов А.А., Дук Д.В. Синхронизация технологий раскряга бревен и сушки пиломатериалов // Изв. вузов. Лесн. журн. 2025. № 6. С. 131–141. <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2025-6-131-141>

Original article

Synchronization of Log Cutting and Sawn Timber Drying Technologies

Victor V. Ogurtsov, Doctor of Engineering, Prof.; ResearcherID: [AAZ-7418-2020](https://orcid.org/0000-0002-8995-0496),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8995-0496>

Elena V. Kargina, Candidate of Engineering; ResearcherID: [AAZ-7109-2020](https://orcid.org/0000-0003-0158-8259),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0158-8259>

Aleksandr A. Orlov, Candidate of Engineering, Assoc. Prof.; ResearcherID: [KBA-4858-2024](https://orcid.org/0000-0002-9370-7544),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9370-7544>

Daniil V. Duk[✉], Postgraduate Student; ResearcherID: [AIF-4170-2022](https://orcid.org/0000-0001-9821-0927),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9821-0927>

Reshetnev Siberian State University of Science and Technology, prosp. imeny gazety “Krasnoyarskiy rabochiy”, 31, Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation; vogurtsov@mail.ru, ev_kargina@mail.ru, Orlov.tepl@mail.ru, danil.duk@yandex.ru[✉]

Received on June 6, 2025 / Approved after reviewing on September 13, 2025 / Accepted on September 15, 2025

Abstract. The research is devoted to the synchronization of log cutting and sawn timber drying processes. It has been shown that, given the actual number of sawn timber sections produced by large-scale sawmilling during the technological period, the buffer storage units of drying stacks of boards do not ensure the uninterrupted operation of the tunnels. There is either an overflow of buffer storage units with stacks, or their absence when free space occurs in the tunnels. The methods used for calculating the buffer storage units of the stacks do not take into account the probabilistic nature of the characteristics of sawmills and drying shops. They do not provide a mathematical description of the relationships between the rate of incoming raw sawn timber stacks, the capacity of the buffer storage unit, as well as the number and capacity of drying tunnels. The aim of this work has been to find the patterns of accumulation of sawn timber stacks in front of drying tunnels and loading tunnels with stacks, with the establishment of the average waiting time for stacks in the storage unit under different characteristics of log sawing and sawn timber drying processes. The “stack storage unit – drying tunnels” system has been presented as a multi-channel queuing system with parallel operation of channels and waiting. The main initial indicators of the system are the rate of incoming raw sawn timber stacks to the storage unit in front of the drying tunnels and the intensity of sawn timber drying in 1 tunnel. The main output operational characteristics are the probability of a full tunnel load, the average number of stacks in the storage unit, and the time the stack remains in the storage unit. The general patterns of accumulation of board stacks and filling of drying tunnels in the conditions of large-scale production of sawn timber have been established. The examples of solving practical

problems of synchronizing sawmilling and sawn timber drying have been presented. It has been shown that the obtained graphs and mathematical models make it possible to solve production problems: to analyze the influence of the type and size of the sawn raw material, the structure of the sawing patterns, the feed rates of the sawmill equipment, the operating modes of the sawmill, as well as the drying modes of the sawn timber on the choice of the number of tunnels and their capacity.

Keywords: sawing, sawn timber, storage unit, drying tunnel, synchronization, drying

For citation: Ogurtsov V.V., Kargina E.V., Orlov A.A., Duk D.V. Synchronization of Log Cutting and Sawn Timber Drying Technologies. *Lesnoy Zhurnal* = Russian Forestry Journal, 2025, no. 6, pp. 131–141. (In Russ.). <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2025-6-131-141>

Введение

Производственный процесс крупно-поточного лесопильного предприятия представляет собой цепь высокопроизводительных линий, соединенных межлинейными буферными накопителями [4–7, 10, 16–25]. Последние обеспечивают формирование партий запуска линий при смене размерных характеристик обрабатываемых материалов и синхронизацию линий в условиях их стационарного стохастического функционирования. Опыт эксплуатации крупно-поточных лесопильных предприятий позволил сформулировать параметрические условия их гармоничной работы [4–7, 16]. Одно из основных условий состоит в том, что в течение технологического периода следует вырабатывать не более 8 сечений пиломатериалов. В настоящее время на крупнопоточных предприятиях это требование почти не выполняется из-за большого количества мелких заказов со специфическими сечениями пиломатериалов, которые не поддаются группированию и унификации [7]. В результате на стыке лесопильных и сушильных цехов возникают нештатные ситуации с переполнением накопителей или нехваткой штабелей для загрузки сушильных туннелей. Встают вопросы вместимости буферного накопителя штабелей, а также количества и емкости сушильных туннелей для обеспечения их оптимального функционирования при реально существующем количестве сечений пиломатериалов и закономерностях их поступления из лесопильного цеха [11].

Цель работы – найти закономерности накопления штабелей пиломатериалов перед сушильными туннелями и загрузки туннелей штабелями с установлением среднего времени ожидания штабелей в накопителе при различных характеристиках процессов распиловки бревен и сушки пиломатериалов.

Объекты и методы исследования

В работе авторов [12] система «накопитель штабелей – сушильные туннели» представлена как мультиканальная система массового обслуживания с параллельным функционированием с каналов и ожиданием [1–3, 8, 9, 13–15].

Основными исходными операционными характеристиками системы являются: интенсивность λ поступления штабелей пиломатериалов в накопитель перед сушильными туннелями; интенсивность μ сушки пиломатериалов в

1 туннеле; коэффициент загруженности ρ 1-й позиции туннеля (трафик, интенсивность) и количество туннелей c .

В рассматриваемой задаче λ представляет собой производительность лесопильного производств за 1 сут., выраженную в количестве сушимых штабелей:

$$\lambda = \frac{Q_{\text{сут}}^{\text{пм}} \Delta_{\text{тол}}^j}{K_{\text{тол}}^j H_{\text{шт}} B_{\text{шт}} L_{\text{шт}} K_{\text{шт}}^j}, \quad (1)$$

где $Q_{\text{сут}}^{\text{пм}}$ – объем пиломатериалов, м³/сут.; $\Delta_{\text{тол}}^j$ – доля пиломатериалов j -й группы толщин, $j = 1$ для тонких или $j = 2$ для толстых; $K_{\text{тол}}^j$ – количество толщин j -й группы толщин; $H_{\text{шт}}$, $B_{\text{шт}}$, $L_{\text{шт}}$ – высота, ширина и длина соответственно сушеного штабеля, м; $K_{\text{шт}}^j$ – коэффициент объемного заполнения штабеля пиломатериалами j -й толщины.

Интенсивность μ определяет производительность 1 сушильного туннеля за 1 сут., также выраженную в штабелях:

$$\mu = \frac{24E_{\text{т}}}{\tau_{\text{суш}}^j}, \quad (2)$$

где $E_{\text{т}}$ – емкость туннеля, количество штабелей; $\tau_{\text{суш}}^j$ – продолжительность сушки пиломатериалов j -й толщины, ч.

Тогда

$$\rho = \frac{\lambda}{\mu}$$

является безразмерным отношением производительностей процессов раскря бревен и сушки пиломатериалов при условии функционирования 1 туннеля и без привязки к продолжительности технологического периода, как это предусмотрено в теории массового обслуживания [1, 14, 15].

Основными выходными операционными характеристиками при стационарной фазе процесса является вероятность $P_{\text{пз}}$ полной загрузки туннелей, среднее количество штабелей L_q в накопителе и среднее время W_q нахождения штабеля в накопителе [1, 12, 14, 15]:

$$P_{\text{пз}} = \frac{\rho^c}{c! \left(1 - \frac{\rho}{c}\right)} \left(\sum_{j=0}^{c-1} \frac{\rho^j}{j!} + \frac{\rho^c}{c! \left(1 - \frac{\rho}{c}\right)} \right)^{-1}, \quad (3)$$

$$L_q = P_{\text{пз}} \frac{\rho}{c - \rho}, \quad (4)$$

$$W_q = \frac{L_q}{\lambda}.$$

Результаты исследования и их обсуждение

В табл. 1 представлены зависимости вероятности полной загрузки туннелей от их количества.

Таблица 1

Вероятность полной загрузки туннелей, %, в зависимости от их количества
The probability of tunnels being fully loaded, %, depending on their number

ρ	Количество туннелей						
	2	3	4	5	6	7	8
1,0	33,33	9,09	2,04	—	—	—	—
1,2	44,99	14,11	3,70	—	—	—	—
1,4	57,64	20,33	6,03	1,53	—	—	—
1,6	71,11	27,37	9,06	2,58	—	—	—
1,8	85,26	35,47	12,85	4,04	1,11	—	—
2,0	100,00*	44,44	17,39	5,97	1,80	—	—
2,2	—	54,21	21,67	8,39	2,74	—	—
2,4	—	64,71	28,70	11,35	3,99	1,25	—
2,6	—	75,88	35,44	14,86	5,58	1,87	—
2,8	—	87,66	42,86	18,95	7,54	2,70	—
3,0	—	100,00*	50,94	23,61	9,91	3,76	1,29
3,2	—	—	59,64	28,85	12,71	5,08	1,84
3,4	—	—	68,93	34,66	15,95	6,69	2,56
3,6	—	—	78,77	41,03	19,65	8,62	3,46
3,8	—	—	89,14	47,95	23,82	10,68	4,56
4,0	—	—	100,00*	55,41	28,47	13,51	5,90
4,2	—	—	—	63,37	33,59	16,50	7,49
4,4	—	—	—	71,83	39,19	19,68	9,35
4,6	—	—	—	80,77	45,25	23,65	11,50
4,8	—	—	—	90,16	51,77	27,83	13,95
5,0	—	—	—	100,00*	58,75	32,41	16,72
5,2	—	—	—	—	66,16	37,40	19,82
5,4	—	—	—	—	74,01	42,79	23,37
5,6	—	—	—	—	82,27	48,59	27,06
5,8	—	—	—	—	90,94	54,79	31,20
6,0	—	—	—	—	100,00*	61,38	35,69

*Значения получены экстраполированием.

Математические модели полной загрузки туннелей имеют вид:

$$\begin{aligned}
 P_{пз}^2 &= 9,55\rho^2 + 38,14\rho - 14,44; \\
 P_{пз}^3 &= 10,10\rho^2 + 5,44\rho - 6,86; \\
 P_{пз}^4 &= 8,56\rho^2 - 9,83\rho + 2,98; \\
 P_{пз}^5 &= 6,79\rho^2 - 16,02\rho + 10,75; \\
 P_{пз}^6 &= 5,57\rho^2 - 20,07\rho + 19,75; \\
 P_{пз}^7 &= 4,55\rho^2 - 21,86\rho + 28,04; \\
 P_{пз}^8 &= 3,53\rho^2 - 20,55\rho + 31,52.
 \end{aligned}
 \tag{5}$$

Из рис. 1 видно, что вероятность полной загрузки туннелей существенно зависит от отношения производительностей лесопильного цеха и туннеля, а также от количества туннелей. Степень влияния ρ на $P_{пз}^c$ явно ослабевает при увеличении количества туннелей от 2 до 8. Все зависимости $P_{пз}^c$ от ρ описыва-

ются полиномами 2-й степени с достаточно высокими коэффициентами детерминации – от 0,9997 до 1 (5).

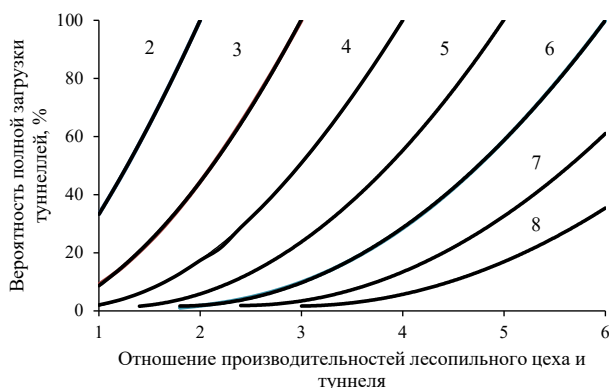


Рис. 1. Зависимость вероятности полной загрузки туннелей от отношения производительностей лесопильного цеха и туннеля (2...8 – количество туннелей)

Fig. 1. The dependence of the probability of full loading of tunnels on the ratio of sawmill and tunnel productivity (2...8 – number of tunnels)

Семейство графиков, представленных на рис. 1, показывает, что 100%-я загрузка туннелей при любом их количестве достигается в случае $c = \rho$. Однако из формул (1), (2) видно, что равенство $c = \rho$ математически недопустимо. Поэтому в расчетах использовались близкие к недопустимым значения ρ . Например, при $c = 3$ вместо $\rho = 3$ принимали $\rho = 2,9$.

Представленные на рис. 1 графики и математические модели (3) позволяют находить вероятности полной загрузки туннелей при известном соотношении производительностей лесопильного цеха и туннеля для данной породы и группы толщин досок.

Если, например, соотношение производительностей на предприятии $\rho = 4,55$ и оно располагает 5 туннелями, то вероятность их полной загрузки составляет 80 %. Следовательно, 20 % продолжительности суток (около 5 ч) хотя бы 1 туннель окажется недозагружен, а в накопитель не поступит соответствующих штабелей.

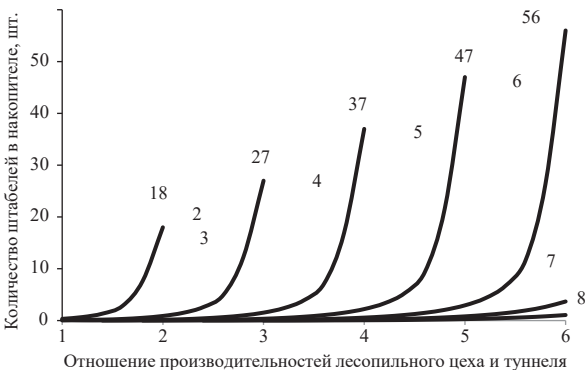
Если, например, 30 % пиломатериалов данной породы и группы толщин могут быть высушены в существующих камерах периодического действия, то для 70 % пиломатериалов закупаются туннели. Соотношение производительностей лесопильного цеха и туннеля составляет $\rho = 3,5$. Тогда, откладывая по осям координат 3,5 и 70, попадаем на кривую 4. Следовательно, необходимо установить на предприятии 4 сушильных туннеля.

Из рассмотренных примеров видно, что полученные графики и математические модели позволяют решать производственные задачи: анализировать влияние породы и размеров распиливаемого сырья, структуры поставок, скоростей подачи бревнопильного оборудования, режимов работы лесопильного цеха, а также режимов сушки пиломатериалов на выбор количества туннелей и их вместимости.

Представленные на рис. 2 графики и математические модели (6), а также данные табл. 2 описывают закономерности процесса накопления штабелей досок перед их загрузкой в туннели в зависимости от соотношения ρ производительностей процессов раскря бревен и сушки пиломатериалов, а также от количества используемых сушильных туннелей. Они позволяют решать практические задачи синхронизации лесопиления и сушки пиломатериалов.

Рис. 2. Зависимость количества штабелей в накопителе от отношения производительностей лесопильного цеха и туннеля (2...8 – количество туннелей)

Fig. 2. The dependence of the number of stacks in the storage unit on the ratio of the sawmill and tunnel productivity (2...8 – number of tunnels)



$$\begin{aligned} L_q^2 &= 38,6\rho^3 - 143,97\rho^2 + 179,4\rho - 73,77; \\ L_q^3 &= 12,31\rho^4 - 84,73\rho^3 + 213,23\rho^2 - 230,59\rho + 90,13; \\ L_q^4 &= 3,37\rho^5 - 37,23\rho^4 + 158,42\rho^3 - 322,55\rho^2 + 312,7\rho - 115,03; \\ L_q^5 &= 2,12\rho^5 - 30,64\rho^4 + 171,33\rho^3 - 461,24\rho^2 + 595,81\rho - 294,75; \\ L_q^6 &= 1,31\rho^5 - 23,28\rho^4 + 160,86\rho^3 - 537,22\rho^2 + 864,64\rho - 535,6; \\ L_q^7 &= 0,47\rho^2 - 3,19\rho + 5,26; \\ L_q^8 &= 0,18\rho^2 - 1,30\rho + 2,36. \end{aligned} \tag{6}$$

Таблица 2

Среднее количество штабелей в накопителе в зависимости от числа туннелей
The average number of stacks in the storage unit depending on the number of tunnels

ρ	Количество штабелей при числе туннелей						
	2	3	4	5	6	7	8
1,0	0,33	0,05	0,07	—	—	—	—
1,2	0,67	0,16	0,03	—	—	—	—
1,4	1,34	0,18	0,03	0,01	—	—	—
1,6	2,84	0,31	0,06	0,01	—	—	—
1,8	7,67	0,53	0,11	0,02	0	—	—
2,0	18,00	0,89	0,17	0,04	0,01	—	—
2,2	—	1,49	0,26	0,07	0,02	—	—
2,4	—	2,59	0,43	0,10	0,03	0,01	—
2,6	—	4,93	0,66	0,16	0,04	0,01	—
2,8	—	12,27	1,00	0,24	0,07	0,02	—
3,0	—	27,00*	1,53	0,35	0,10	0,03	0,01
3,2	—	—	2,39	0,51	0,15	0,04	0,01
3,4	—	—	3,91	0,74	0,21	0,06	0,02
3,6	—	—	7,09	1,06	0,29	0,09	0,03
3,8	—	—	16,94	1,52	0,41	0,13	0,04
4,0	—	—	37,00*	2,22	0,57	0,18	0,06
4,2	—	—	—	3,33	0,78	0,25	0,08
4,4	—	—	—	5,27	1,08	0,33	0,11
4,6	—	—	—	9,29	1,49	0,45	0,16
4,8	—	—	—	21,64	2,07	0,61	0,21
5,0	—	—	—	47,00*	2,94	0,81	0,28

Окончание табл. 2

ρ	Количество штабелей при числе туннелей						
	2	3	4	5	6	7	8
5,2	—	—	—	—	4,30	1,08	0,37
5,4	—	—	—	—	6,66	1,44	0,49
5,6	—	—	—	—	11,52	1,94	0,63
5,8	—	—	—	—	26,37	2,65	0,82
6,0	—	—	—	—	56,00*	3,68	1,07

*Значения определены при $\rho = 0,1$ ($\rho = 1,9; 2,9 \dots$).

Если, например, на предприятии установлено 5 туннелей для сушки досок заданной породы и толщины и перед туннелями для них предусмотрено в накопителе 15 штабелемест, то, используя график 5, определяем предельное отношение производительностей лесопильного и сушильного процессов: $\rho = 4,7$. То есть производительность процесса изготовления данных пиломатериалов не должна превышать производительность 1 туннеля более чем в 4,7 раза. При невыполнении этого требования количество штабелей, ожидающих загрузку в туннели, будет неограниченно возрастать до нереальных объемов. Если, например, $\rho = 4,99$, то в накопителе в среднем будет 517 штабелей. На графике рис. 2 отражено количество штабелей в накопителе при $\rho = c - 0,1$.

Если предприятие в связи с ограниченностью площадей не имеет возможности организовать перед туннелями накопитель вместимостью более чем, например, 10 штабелей, а производительность лесопильного цеха в 3,5 раза превышает производительность 1 туннеля, то для определения требуемого количества туннелей по оси ординат откладываем 10 штабелей, а по оси абсцисс — $\rho = 3,5$. Точка пересечения лежит рядом с графиком 4. Следовательно, для выполнения заданных условий необходимо 4 туннеля. После этого уточняем полученный результат. По оси абсцисс откладываем $\rho = 3,5$ и поднимаемся до кривой 4. Точке пересечения соответствует по оси ординат 5 штабелей в накопителе. Таким образом, при использовании 4 туннелей с соотношением производительностей лесопильного цеха и туннеля 3,5 в накопителе в среднем будет находиться 5 штабелей.

Следует отметить, что при использовании 4 туннелей соотношение производительностей лесопильного цеха и 4 туннелей сушильного цеха составляет 0,875 (3,5:4). То есть при 4 туннелях выполняется фундаментальное правило последовательного сочленения линий, состоящее в обязательном нарастании производительностей. В данном примере производительность 4 сушильных туннелей на 12,5 % выше, чем производительность лесопильного цеха, однако из-за случайных процессов туннели не справляются с потоком штабелей и в накопителе создается «очередь» в среднем из 5 штабелей. Следует отметить, что такая очередь является недостаточной для нормального функционирования туннелей с вероятностью их полной загрузки 95 %. Из рис. 1 и математической модели (1) видно, что при $\rho = 3,5$ и $c = 4$ вероятность полной загрузки равна 73,4 %. Для достижения загрузки 95 % обратными действиями находим $\rho = 3,9$. Затем по формуле (4) и рис. 2 находим количество штабелей в накопителе $L_q = 37$. Для сдерживания дальнейшего роста количества штабелей в накопителе необходимы сушильные камеры периодического действия.

Проведенный анализ показывает, что при повышении вероятности полной загрузки туннелей до 95 % путем установления соотношения производительностей лесопиления и сушки досок на уровне $c = 0,1$ в накопителе формируется очередь в среднем от 18 до 75 штабелей.

Найденные закономерности формирования «очереди штабелей» перед их загрузкой в сушильные туннели позволяют оценивать возможность реализации вариантов синхронизации лесопиления и сушки пиломатериалов.

Таким образом, система «накопитель штабелей – сушильные туннели» чувствительна к соотношению производительностей в области $P_{пз}^c = 95\%$. Небольшое отклонение p в сторону положительных значений от расчетного показателя приводит к лавинообразному накоплению штабелей в накопителе. Для локализации этих процессов сушильные туннели должны работать в сочетании с камерами периодического действия.

Выводы

1. Установлены общие закономерности процессов накопления штабелей досок и заполнения сушильных туннелей в условиях крупнопоточного производства пиломатериалов.

2. Получены графики и математические модели, позволяющие прогнозировать количество штабелей в накопителе и находить вероятность полной загрузки туннелей при известном соотношении производительностей лесопильного цеха и туннеля для данной породы и группы толщин досок.

3. Представлены примеры решения практических задач синхронизации лесопиления и сушки пиломатериалов.

4. Показано, что полученные графики и математические модели дают возможность оценивать влияние породы и размеров распиливаемого сырья, структуры поставов, скоростей подачи бревнопильного оборудования, режимов работы лесопильного цеха, а также режимов сушки пиломатериалов на количество туннелей и их вместимость.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Вагнер Г. Основы исследования операций. М.: Мир, 1973. Т. 3. 501 с.
Wagner G. *Fundamentals of Operations Research*. Moscow, Mir Publ. House, 1973, vol. 3. 501 p. (In Russ.).
2. Вентцель Е.С., Овчаров Л.А. Теория вероятностей и ее инженерные приложения. М.: Наука, 1988. 480 с.
Ventzel E.S., Ovcharov L.A. *Probability Theory and its Engineering Applications*. Moscow, Nauka Publ., 1988. 480 p. (In Russ.).
3. Зорин А.В., Зорин В.А., Пройдакова Е.В., Федоткин М.А. Введение в общие цепи Маркова. Н. Новгород: Нижегородск. гос. ун-т, 2013. 51 с.
Zorin A.V., Zorin V.A., Projdakova E.V., Fedotkin M.A. *Introduction to General Markov Chains*. Nizhny Novgorod, Nizhny Novgorod State University Publ., 2013. 51 p. (In Russ.).
4. Калишеевский Р.Е. Технология лесопиления. М.: Лесн. пром-сть, 1986. 264 с.
Kaliteevskij R.E. *Sawmilling Technology*. Moscow, Lesnaya promyshlennost' Publ., 1986. 264 p. (In Russ.).
5. Калишеевский Р.Е. Лесопиление в XXI веке. Технология, оборудование, менеджмент. 2-е изд., испр. и доп. СПб.: ПрофиКС, 2008. 499 с.

Kaliteevskij R.E. *Sawmilling in the XXI Century. Technology, Equipment, and Management*: 2nd ed., revised and enlarged. St. Petersburg, ProfiKS Publ., 2008. 499 p. (In Russ.).

6. Калитеевский Р.Е., Артеменков А.М., Тамби А.А. Информационные технологии в лесопилении. СПб.: Профи, 2010. 191 с.

Kaliteevskij R.E., Artemenkov A.M., Tambi A.A. *Information Technologies in Sawmilling*. St. Petersburg, Profi Publ., 2010. 191 p. (In Russ.).

7. Каргина Е.В. Повышение эффективности массового крупно-поточного лесопиления путем управления дробностью сортировки бревен по толщине: дис. ... канд. техн. наук. Красноярск, 2024. 200 с.

Kargina E.V. *Improving the Efficiency of Large-Scale Mass Sawmilling by Controlling the Granularity of Log Sorting by Thickness*: Cand. Tech. Sci. Diss. Krasnoyarsk, 2024. 200 p. (In Russ.).

8. Клейнрок Л. Теория массового обслуживания. М.: Машиностроение, 1979. 432 с. Klejnrok L. *Queueing Theory*. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1979. 432 p. (In Russ.).

9. Новиков Д.А. Сетевые структуры и организационные системы. М.: ИПУ РАН, 2003. 102 с.

Novikov D.A. *Network Structures and Organizational Systems*. Moscow, Institute of Control Sciences of the Russian Academy of Sciences, 2003. 102 p. (In Russ.).

10. Огурцов В.В. Теория брусо-развальной распиловки бревен: моногр. Красноярск: СибГТУ, 2013. 233 с.

Ogurtsov V.V. *Theory of the Cant Sawing of the Logs*: Monograph. Krasnoyarsk, Siberian State Technical University Publ., 2013. 233 p. (In Russ.).

11. Огурцов В.В., Каргина Е.В., Матвеева И.С. Двухкритериальная математическая модель оптимизации дробности сортировки бревен по толщине // Хвойные бореал. зоны. 2024. Т. XLII, № 4. С. 89–94.

Ogurtsov V.V., Kargina E.V., Matveeva I.S. A Two-Criterion Mathematical Model for Optimizing the Fractional Sorting of Logs by Thickness. *Khvojnye borealnoj zony* = Conifers of the Boreal Area, 2024, vol. XLII, no. 4, pp. 89–94. (In Russ.).

<https://doi.org/10.53374/1993-0135-2024-4-89-94>

12. Огурцов В.В., Орлов А.А., Дук Д.В. Идентификация проблемы синхронизации процессов раскряса бревен и сушки пиломатериалов // Хвойные бореал. зоны. 2025. Т. XLIII, № 2. С. 70–76.

Ogurtsov V.V., Orlov A.A., Duk D.V. Identification of the Problem of Synchronization of Log Cutting and Sawed Timber Drying Processes. *Khvojnye borealnoj zony* = Conifers of the Boreal Area, 2025, vol. XLIII, no. 2, pp. 70–76. (In Russ.).

<https://doi.org/10.53374/1993-0135-2025-2-70-76>

13. Оре О. Теория графов. М.: Наука, 1968. 352 с.

Ore O. *Graph Theory*. Moscow, Nauka Publ., 1968. 352 p. (In Russ.).

14. Таха Х. Введение в исследование операций. Т. 2. М.: Мир, 1985. 496 с.

Takha Kh. *Introduction to Operations Research*. Moscow, Mir Publ. House, 1985, vol. 2. 496 p. (In Russ.).

15. Трухан А.А., Кудряшев Г.С. Теория вероятностей в инженерных приложениях. Иркутск: Форвард, 2009. 364 с.

Trukhan A.A., Kudryashev G.S. *Probability Theory in Engineering Applications*. Irkutsk, Forward Publ., 2009. 364 p. (In Russ.).

16. Турушев В.Г. Технологические основы автоматизированного производства пиломатериалов. М.: Лесн. пром-сть, 1975. 208 с.

Turushev V.G. *Technological Foundations of Automated Lumber Production*. Moscow, Lesnaya promyshlennost' Publ., 1975. 208 p. (In Russ.).

17. Chang S.J., Gazo R. Measuring the Effect of Internal Log Defect Scanning on the Value of Lumber Produced. *Forest Products Journal*, 2009, vol. 59, iss. 11–12, pp. 56–59. <https://doi.org/10.13073/0015-7473-59.11.56>

18. Hébert F., Grondin F., Plaice J. Mathematical Modeling of Curve Sawing Techniques for Lumber Industry. *Applied Mathematical Modelling*, 2000, vol. 24, iss. 8–9, pp. 677–687. [https://doi.org/10.1016/S0307-904X\(00\)00009-3](https://doi.org/10.1016/S0307-904X(00)00009-3)
19. Hinostroza I., Pradenas L., Parada V. Board Cutting from Logs: Optimal and Heuristic Approaches for the Problem of Packing Rectangles in a Circle. *International Journal of Production Economics*, 2013, vol. 145, iss. 2, pp. 541–546. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2013.04.047>
20. Ikami Y., Matsumura Y., Murata K., Tsuchikawa S. Effect of Crosscutting Crooked Sugi (*Cryptomeria japonica*) Logs on Sawing Yield and Quality of Sawed Lumber. *Forest Products Journal*, 2010, vol. 60, iss. 3, pp. 244–248. <https://doi.org/10.13073/0015-7473-60.3.244>
21. Johansson J. Mechanical Processing for Improved Products Made from Swedish Hardwood. *Acta Wexionensia*, 2008, no. 157. 46 p.
22. Lin W., Wang J., Wu J., DeVallance D. Log Sawing Practices and Lumber Recovery of Small Hardwood Sawmills in West Virginia. *Forest Products Journal*, 2011, vol. 61, iss. 3, pp. 216–224. <https://doi.org/10.13073/0015-7473-61.3.216>
23. Makkonen M. *Renewing the Sawmill Industry: Studies on Innovation, Customer Value and Digitalization*: Academic Dissertation. Finland, Helsinki, University of Helsinki, Dissertationes Forestales 269, 2019. 65 p. <https://doi.org/10.14214/df.269>
24. Montero R.S., Moya R. Reducing Warp and Checking in 4 by 4 Beams from Small-Diameter Tropical Species (*Tectona grandis*, *Gmelina arborea*, and *Cordia alliodora*) Obtained by Turning the Pith Inside Out. *Forest Products Journal*, 2015, vol. 65, iss. 5–6, pp. 285–291. <https://doi.org/10.13073/FPJ-D-14-00089>
25. Murara Junior M.I., Pereiro da Rocha M., Trugilho P.F. Estimativa do Rendimento em Madeira Serrada de Pinus para Duas Metodologias de Desdobro. *Floresta e Ambiente*, 2013, vol. 20, no. 4, pp. 556–563. (In Port.). <http://dx.doi.org/10.4322/floram.2013.037>

Конфликт интересов: Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов

Conflict of interest: The authors declare that there is no conflict of interest