

ДЕРЕВООБРАБАТЫВАЮЩАЯ ПРОМЫШЛЕННОСТЬ

WOODWORKING INDUSTRY

УДК 674.09

Д. В. Божко, И. К. Божелко, Л. В. Игнатович
Белорусский государственный технологический университет

СТАТИСТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ И ВЕРИФИКАЦИЯ АЛГОРИТМА ОПТИМИЗАЦИИ РАСКРОЯ КРУГЛЫХ ЛЕСОМАТЕРИАЛОВ НА ОСНОВЕ АЛГОРИТМИЧЕСКИХ РАСЧЕТОВ

В статье представлен статистический анализ и верификация алгоритма раскроя круглых лесоматериалов на основе алгоритмического расчета при помощи программно-технологического модуля по оптимальному расчету раскроя и нормированию расхода лесопроductии. Данное исследование позволяет уменьшить рабочее время на составление карт раскроя, адаптируя графическо-аналитические методы к компьютерным симуляциям на языке программирования Python, с акцентом на минимизацию отходов и повышение эффективности лесопиления.

Целью данного исследования является верификация алгоритмов оптимизации раскроя для подтверждения их достоверности и надежности.

В качестве обработки данных используется Критерий Стьюдента (t -тест). Результаты показывают статистически значимые различия: вычисленные t -значения (t_1-t_6) не превышают критическое $t_{\text{крит}} = 1,976$ ($df = 150$, $\alpha = 0,05$), с $p\text{-value} < 0,05$, что подтверждает повышение объемного выхода пиломатериалов на 4–6% по сравнению с контрольными расчетами.

Исследуемые алгоритмы верифицированы и рекомендуются для практического применения в лесоперерабатывающей промышленности, способствуя снижению себестоимости и автоматизации процессов лесопиления.

Ключевые слова: статистический анализ, верификация алгоритма, оптимальное использование древесины, алгоритм оптимизации раскроя.

Для цитирования: Божко Д. В., Божелко И. К., Игнатович Л. В. Статистический анализ и верификация алгоритма оптимизации раскроя круглых лесоматериалов на основе алгоритмических расчетов // Труды БГТУ. Сер. 1, Лесное хоз-во, природопользование и перераб. возобновляемых ресурсов. 2026. № 1 (300). С. 80–89.

DOI: 10.52065/2519-402X-2026-300-7.

D. V. Bazhko, I. K. Bazhelka, L. V. Ignatovich
Belarusian State Technological University

STATISTICAL ANALYSIS AND VERIFICATION OF AN OPTIMIZATION ALGORITHM FOR CUTTING ROUND TIMBER BASED ON ALGORITHMIC CALCULATIONS

This article presents a statistical analysis and verification of a round timber cutting algorithm based on algorithmic calculations using a software and technology module for optimal cutting calculations and standardization of timber consumption. This study reduces the time required to create cutting maps by adapting graphical and analytical methods to computer simulations in Python, with an emphasis on minimizing waste and increasing sawmill efficiency.

The aim of this study is to verify cutting optimization algorithms to confirm their validity and reliability.

The Student's t -test is used for data processing. The results show statistically significant differences: the calculated t -values (t_1 – t_6) do not exceed the critical value $t_{\text{crit}} = 1.976$ ($df = 150$, $\alpha = 0.05$), with a p -value < 0.05 , confirming an increase in lumber yield by 4–6% compared to control calculations.

The studied algorithms have been verified and are recommended for practical application in the wood industry, contributing to cost reduction and automation of sawmilling processes.

Keywords: statistical analysis, algorithm verification, optimal use of wood, cutting optimization algorithm.

For citation: Bazhko D. V., Bazhelka I. K., Ignatovich L. V. Statistical analysis and verification of an optimization algorithm for cutting round timber based on algorithmic calculations // *Proceedings of BSTU, issue 1, Forestry. Nature Management. Processing of Renewable Resources*, 2026, no. 1 (300), pp. 80–89 (In Russian).

DOI: 10.52065/2519-402X-2026-300-7.

Введение. Основная задача раскроя круглых лесоматериалов на основе алгоритмического расчета заключается в максимальном использовании древесины, минимизации отходов и удовлетворении требований к качеству продукции.

Для анализа алгоритма раскроя разработано программное обеспечение, которое осуществляет алгоритмический расчет. Система обеспечивает мощные аналитические инструменты для внедрения статистического анализа.

Данный программно-технологический модуль предполагает оптимизацию процессов и переход от графическо-аналитического подхода к вычислительным методам постановки задач на электронно-вычислительных машинах (ЭВМ), реализуемым посредством алгоритмов оптимизации и аппроксимации данных с использованием языка программирования Python.

Алгоритм раскроя включает в себя шаги по планированию, расчету и оптимизации. Он позволяет не только осуществлять расчет оптимальных размеров деталей, но и выполнять проверку расчетов с использованием статистических методов. Разработанный модуль осуществляет автоматизированный расчет и позволяет пользователю получить достоверные данные для анализа, что делает его полезным инструментом для специалистов в деревообрабатывающей отрасли [1].

Эффективность раскроя круглых лесоматериалов является критически важным фактором, определяющим рентабельность лесоперерабатывающих предприятий. В условиях роста конкуренции и требований к ресурсосбережению даже незначительное повышение выхода полезной продукции может принести существенный экономический эффект. В ответ на эту задачу разрабатываются многочисленные алгоритмические решения – от классических жадных алгоритмов и методов динамического программирования до современных эвристических и метаэвристических подходов, таких как генетические алгоритмы [2].

Однако разработка алгоритма раскроя круглых лесоматериалов на основе алгоритмического расчета, демонстрирующего высокую производительность на ограниченном наборе тестовых примеров, является лишь первым этапом. Ключевой проблемой, с которой сталкиваются инженеры, является объективная оценка нового метода над существующими аналогами. Заявления об эффективности, не подкрепленные статистической проверкой, остаются лишь гипотезами, непригодными для принятия взвешенных решений о внедрении в производственный процесс.

Необходимость статистического анализа и верификации продиктована несколькими фундаментальными причинами.

Задачи оптимизации раскроя часто обладают высокой вычислительной сложностью, что приводит к вариабельности результатов между отдельными запусками алгоритма.

Реальные исходные данные – сортамент, размеры и дефекты лесоматериалов – сами по себе являются переменными величинами, подверженными естественному разбросу.

Оценка алгоритма на единственном наборе данных может привести к ошибочным и нерепрезентативным выводам.

Основная часть. Целью настоящего исследования является разработка комплексного методологического подхода к верификации алгоритмов оптимизации раскроя, обеспечивающего доказательную базу для их достоверности и надежности. Для достижения поставленной цели в работе решаются следующие задачи:

1) формирование многоуровневой системы проверки:

– верификация корректности расчетов;

– валидация эффективности;

2) апробация алгоритма оптимизации раскроя круглых лесоматериалов на основе алгоритмических расчетов при помощи программно-технологического модуля по оптимальному расчету раскроя и нормированию расхода лесопроductии;

3) количественная оценка достоверности результатов с применением аппарата статистической проверки гипотезы и его эффективности [3].

Для статистического анализа и верификации алгоритма оптимизации раскроя круглых лесоматериалов на основе алгоритмических расчетов будет использован критерий Стьюдента. Он позволяет определить, насколько вероятно, что наблюдаемые различия между средними значениями групп статистически значимы, а не являются результатом случайности. Для этого необходимо удостовериться в правильности выборки данных для критерия Стьюдента и рассчитать дисперсию, стандартное отклонение и непосредственно критерий Стьюдента [4].

Для обеспечения всестороннего анализа эффективности алгоритмического расчета при помощи программно-технологического модуля по оптимальному расчету раскроя и нормированию расхода лесопроductии сформируем шесть репрезентативных выборок данных. Эти выборки разработаны с целью охвата ключевых аспектов алгоритмических расчетов, включающих вариативность входных параметров (таких как диаметр, длина и порода бревен), итеративные процессы оптимизации (с использованием аппроксимационных методов и численных алгоритмов на языке Python), а также оценку устойчивости результатов при различных сценариях обработки. Каждая выборка данных содержит не менее 152 наблюдений для выполнения статистических требований, обеспечивающих достаточную мощность для последующего применения параметрических тестов и корреляционного анализа.

В рамках темы исследования «Статистический анализ и верификация алгоритма раскроя круглых лесоматериалов на основе алгоритмического расчета» рассмотрены четыре оптимальных варианта раскроя бревен, рассчитанных с помощью традиционного подхода и программно-технологического модуля по оптимальному расчету раскроя и нормированию расхода лесопроductии (табл. 1). Данный алгоритм рассчитывает максимальный количественный выход, который иллюстрирует переход от традиционных графических методов к компьютерной оптимизации. Эти варианты включают:

– распиловку с брусовкой с четным поставом на втором проходе;

– распиловку с брусовкой с нечетным поставом на втором проходе;

– раскрой вразвал с четным поставом;

– раскрой вразвал с нечетным поставом.

Такая комбинация выборок и вариантов раскроя обеспечивает комплексную оценку алгоритмов, включающую их чувствительность к входным данным, сходимость итераций и сравнительную эффективность по критериям выхода продукции и минимизации отходов [5–7].

До процедуры приведения данных к среднему значению объем исходной выборки составлял 456 наблюдений.

Таблица 1. **Общая выборка исследуемых и контрольных значений**

Диаметр бревна, мм	Объемный выход пиломатериалов, %							
	Контрольные значения				Исследуемые значения			
	Брусковка с поставом		Вразвал с поставом		Брусковка с поставом		Вразвал с поставом	
	четным	нечетным	четным	нечетным	четным	нечетным	четным	нечетным
Выборка № 1								
14	60,0	57,6	66,6	66,1	65,7	56,4	69,3	72,1
16	59,6	53,3	68,2	56,7	61,7	52,4	70,9	60,5
18	67,6	61,2	62,5	57,6	72,0	55,9	70,1	61,5
20	61,7	60,5	64,4	62,1	60,6	70,6	65,3	66,7
...								
42	60,4	53,3	60,3	61,9	65,1	55,3	67,5	66,5
44	62,2	53,1	66,9	58,0	63,6	54,7	70,6	62,3
46	63,8	55,5	59,6	62,3	67,1	60,0	62,5	68,8
48	59,3	56,8	63,8	66,7	66,5	61,7	67,3	69,2
50	70,8	67,1	51,1	62,7	72,4	68,4	54,1	63,8
Среднее значение	62,4	60,5	60,9	62,4	65,1	62,5	63,3	65,5
...								
Выборка № 6								
14	55,6	63,6	58,2	62,5	52,7	68,0	59,8	64,9
16	65,3	60,5	67,5	60,7	67,3	58,6	68,8	63,7
18	61,0	60,6	58,7	65,0	61,9	64,5	65,8	69,2
20	65,5	71,7	57,3	58,4	69,9	70,6	59,1	61,1
...								
42	65,9	61,8	59,7	56,3	63,4	60,1	59,9	59,5
44	61,5	63,3	60,3	60,2	62,6	63,1	61,4	62,4
46	64,6	60,7	62,7	56,0	69,7	61,4	62,8	58,7
48	58,5	60,3	59,1	66,0	63,5	62,9	61,0	73,9
50	63,5	54,7	65,9	60,7	66,1	55,3	69,4	62,5
Среднее значение	61,8	62,6	59,2	61,7	64,8	63,6	60,9	64,3

После выполнения данной процедуры объем выборки скорректирован до 76 наблюдений, что достигается путем фильтрации данных для устранения избыточности и повышения точности оценок (табл. 2).

Этот скорректированный объем ($n = 76$) полностью соответствует минимальным требованиям для применения t -критерия. Согласно стандартным статистическим рекомендациям, для двустороннего теста при уровне значимости $\alpha = 0,05$ требуется минимум 30–50 наблюдений, а предпочтительно более 60–100 для обеспечения робастности результатов и минимизации риска отклонения нулевой гипотезы по ошибке.

Таким образом, данная выборка позволяет провести сравнительный анализ средних значений между вариантами раскroев с высокой степенью достоверности [8–10].

Для корректного применения t -критерия Стьюдента (t -test), предназначенного для сравнения средних значений двух независимых выборок, ключевым условием является подчинение анализируемого признака нормальному закону распределения в каждой из сравниваемых групп. Это предположение лежит в основе статистической модели t -критерия, которая опирается на свойства нормального распределения для точной оценки стандартной ошибки разности средних и расчета критических значений t -статистики.

Таблица 2. Выборка исследуемых и контрольных значений по средним

Диаметр бревна, мм	Среднее значение объемного выхода пиломатериалов для выборки, %					
	1	2	3	4	5	6
Выборка контрольных данных						
14	62,6	58,0	64,1	61,6	63,4	60,0
16	59,5	62,6	63,1	63,6	62,8	63,5
18	62,2	64,3	62,9	60,3	62,0	61,3
20	62,2	64,5	62,9	58,0	62,2	63,2
22	60,2	63,4	61,4	63,0	61,2	62,9
24	61,8	59,7	64,1	63,5	62,6	63,4
26	60,6	59,4	59,8	58,4	63,0	57,5
...						
42	59,0	62,0	64,5	62,0	65,5	60,9
44	60,1	60,5	58,5	62,5	60,6	61,3
46	60,3	61,2	59,7	61,3	64,4	61,0
48	61,7	63,1	61,0	60,1	63,2	61,0
50	62,9	63,9	62,0	62,9	60,8	61,2
Среднее значение	61,5	62,1	61,8	61,6	62,0	61,3
Выборка исследуемых данных						
14	65,9	58,0	67,0	64,0	65,3	61,3
16	61,4	64,6	66,0	64,4	64,1	64,6
18	64,8	67,6	64,2	62,2	63,2	65,4
20	65,8	67,4	63,5	59,9	65,0	65,2
22	61,5	67,2	63,5	65,1	63,3	63,6
24	64,0	63,0	65,5	63,6	64,7	64,3
26	63,6	60,4	60,8	60,3	64,0	60,6
...						
42	63,6	65,1	69,4	63,3	67,6	60,7
44	62,8	63,2	59,5	62,7	62,6	62,3
46	64,6	64,3	63,2	60,9	66,6	63,2
48	66,1	67,0	63,1	59,6	67,3	65,3
50	64,7	67,7	63,6	64,4	63,1	63,3
Среднее значение	64,1	64,8	63,9	63,0	63,5	63,4

Нарушение данного условия может привести к искажению результатов, включая завышенную вероятность ошибки первого рода или снижение мощности теста, что особенно критично в исследованиях симуляций [11–13].

Данное требование приобретает особую актуальность для малых выборок (типично $n < 30$, как в рассмотренных нами случаях, где исходные данные в объеме 456 наблюдений усреднены до 76 для каждой группы в табл. 2). При небольших размерах выборки центральная предельная теорема не гарантирует приближения распределения средних к нормальному, даже если исходные данные имеют иную форму распределения.

В таких условиях t -критерий становится чувствительным к отклонениям от нормальности, что может вызвать систематические ошибки в оценке статистической значимости различий между вариантами раскроя (например, между четным и нечетным поставом в распиловке бруса или раскрое вразвал).

Для иллюстрации: если распределение признака (например, процента выхода пиломатериалов или объема отходов) характеризуется асимметрией или наличием выбросов, применение t -теста без проверки нормальности может привести к некорректным выводам.

Чтобы обеспечить соблюдение этого условия, необходимо предварительно провести тестирование на нормальность распределения графическим методом (рис. 1–6). В контексте нашего исследования по оптимизации раскроя древесины такая проверка особенно важна для выборок, сформированных на основе симуляций в Python, где вариативность входных параметров может усиливать ненормальное распределения.

Из графиков (рис. 1–6) можно сделать выводы о нормальности распределения данных, что повышает надежность статистических выводов и способствует интеграции эмпирических данных, минимизируя риски ошибочных интерпретаций эффективности алгоритмов раскря. Это подчеркивает необходимость комплексного подхода к анализу, сочетающего численные симуляции, статистическую валидацию и учет реальных условий лесопиления.

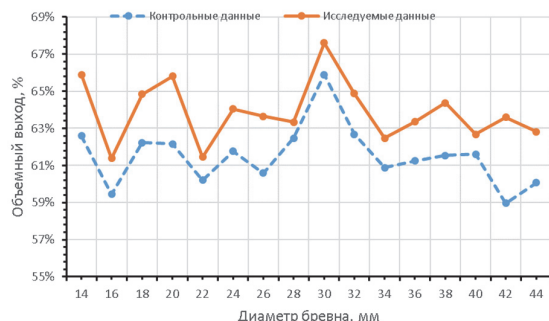


Рис. 1. График по выборке № 1

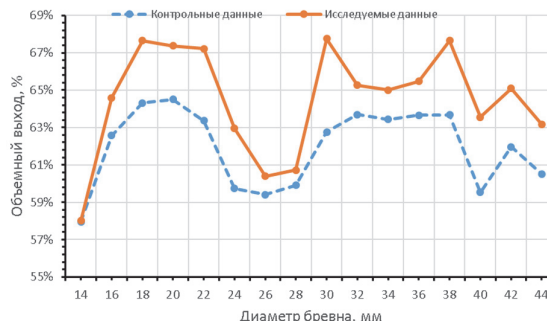


Рис. 2. График по выборке № 2

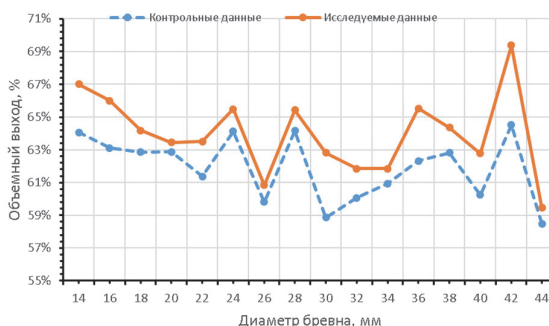


Рис. 3. График по выборке № 3



Рис. 4. График по выборке № 4

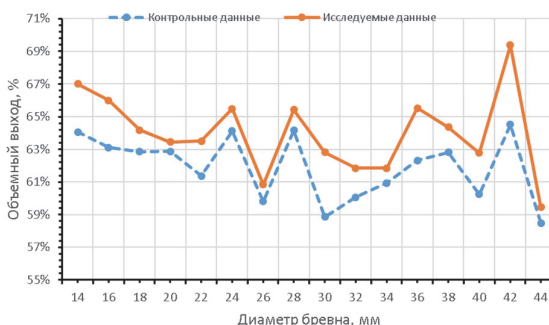


Рис. 5. График по выборке № 5



Рис. 6. График по выборке № 6

Одним из ключевых условий корректного применения параметрических статистических тестов, таких как t -критерий Стьюдента, является соблюдение предположения о равенстве дисперсий в сравниваемых выборках. В стандартном t -критерии Стьюдента необходимо, чтобы дисперсии двух независимых выборок не различались значимо. Это предположение критично, поскольку тест использует объединенную оценку дисперсии для расчета стандартной ошибки разности средних, что обеспечивает корректные степени свободы и доверительные интервалы [14].

В случае несоблюдения данного требования результаты могут быть искажены: например, заниженная мощность теста или повышенный риск ошибки первого, особенно в исследованиях с неравными размерами выборок или малым объемом данных (как в анализе выборок раскря древесины по табл. 1 и табл. 2, где количество наблюдений после приведения к среднему варьирует от 456 до 76).

Дисперсия выборки является мерой разброса данных вокруг среднего значения и рассчитывается как несмещенная оценка для конечных выборок. Дисперсию выборки можно найти по формуле

$$\sigma^2 = \frac{\sum (X_i - M_x)^2}{N - 1}, \quad (1)$$

где X_i – значение i -го наблюдения в выборке; M_x – выборочное среднее; N – объем выборки.

Эта формула применяется отдельно к каждой сравниваемой группе, например для четырех оптимальных видов раскроя в табл. 2, где X_i может представлять метрики эффективности, такие как процент выхода пиломатериалов.

Для расчета t -критерия Стьюдента необходимо перейти от дисперсии к среднеквадратическому отклонению, которое является квадратным корнем дисперсии и измеряется в тех же единицах, что и исходные данные.

Формула среднеквадратического отклонения выглядит следующим образом

$$\sigma = \sigma^2 = \sqrt{\frac{\sum (X_i - M_x)^2}{N - 1}}. \quad (2)$$

Среднеквадратическое отклонение используется для оценки вариабельности данных и входит в состав стандартной ошибки разности средних, что позволяет оценить точность сравнения.

t -Критерий Стьюдента для двух независимых выборок с равными дисперсиями рассчитывается по формуле

$$t = \frac{|M_1 - M_2|}{\sqrt{\frac{\sigma_1^2}{N_1} + \frac{\sigma_2^2}{N_2}}}. \quad (3)$$

Эта формула тестирует нулевую гипотезу (равенство математических ожиданий в генеральной совокупности) против альтернативной.

Полученное значение t сравнивается с критическим значением из распределения Стьюдента с $df = N_1 + N_2 - 2$ степенями свободы; если t превышает критическое значение или соответствующее p -значение $< 0,05$, нулевая гипотеза отвергается, указывая на статистически значимое различие [15].

В контексте оптимизации раскроя древесины по методам раскроя круглых лесоматериалов на основе алгоритмического расчета при помощи программно-технологического модуля по оптимальному расчету раскроя и нормированию расхода лесопроизводства эта формула позволяет сравнивать эффективность, например четного и нечетного поставов в раскросе вразвал (табл. 3).

Таблица 3. Основные статистические характеристики

Название статистической характеристики	Исследуемые выборки					
	№ 1	№ 2	№ 3	№ 4	№ 5	№ 6
Контрольная выборка						
Дисперсия σ^2	0,00024	0,00040	0,00035	0,00039	0,00036	0,00044
Среднеквадратическое отклонение σ	0,015	0,020	0,019	0,020	0,019	0,021
Исследуемая выборка						
Дисперсия σ^2	0,00026	0,00079	0,00052	0,00054	0,00067	0,00053
Среднеквадратическое отклонение σ	0,016	0,028	0,023	0,025	0,026	0,023
Критерий Стьюдента t	1,250	1,013	1,088	1,049	1,049	1,056
Критическое значение критерия Стьюдента	1,976					

Таким образом, строгое соблюдение требования равенства дисперсий обеспечивает надежность статистических выводов, позволяя эффективно сравнивать алгоритмы обработки.

Заключение. В рамках данного исследования (оптимизация раскроя круглых лесоматериалов на основе алгоритмических подходов раскроя при помощи программно-технологического модуля и адаптированных для компьютерных симуляций на языке Python) статистический анализ играет ключевую роль в верификации эффективности предложенных алгоритмов.

Для подтверждения статистически значимых отличий между выборками необходимо рассчитать достигнутый уровень значимости p -value. Этот показатель представляет собой вероятность получения наблюдаемых или более экстремальных результатов при условии истинности нулевой гипотезы.

Далее для интерпретации результатов сравниваем эмпирическое значение t -критерия с теоретическим критическим значением, извлеченным из таблиц критических значений t -критерия Стьюдента.

Для данного анализа, с учетом объединенных степеней свободы $df = 150$ (что соответствует агрегированным выборкам после усреднения, варьирующимся от 76 до 456 наблюдений в табл. 2) и уровня значимости $\alpha = 0,05$, критическое значение $t_{\text{крит}} = 1,976$. Это значение отражает порог, при превышении которого нулевая гипотеза отвергается, указывая на статистически значимое различие между группами. Вычисленные значения t -статистики для шести сравниваемых выборок ($t_1 = 1,250$; $t_2 = 1,013$; $t_3 = 1,088$; $t_4 = 1,049$; $t_5 = 1,049$; $t_6 = 1,056$) не превышают $t_{\text{крит}} = 1,976$, а поэтому соответствующие p -value $< 0,05$. Следовательно, уровень значимости ниже порогового, что позволяет отвергнуть нулевую гипотезу и сделать вывод о наличии статистически значимых различий между группами. Этот результат подтверждается предварительными проверками на равенство дисперсий и нормальность распределений, что обеспечивает корректность применения t -критерия Стьюдента и повышает надежность выводов (табл. 3).

На основе проведенных исследований можно верифицировать алгоритм оптимизации раскроя круглых лесоматериалов, основанный на алгоритмических расчетах. В исследуемых выборках объемный выход пиломатериалов в среднем на 4–6% выше по сравнению с контрольными расчетами, что достигается за счет алгоритмов оптимизации и интеграции графическо-аналитических методов с компьютерными симуляциями. Это повышение эффективности напрямую способствует минимизации отходов в лесопилении, снижению себестоимости производства и улучшению устойчивости лесохозяйственной отрасли.

Таким образом, разработанный алгоритм оптимизации раскроя круглых лесоматериалов на основе алгоритмических расчетов является статистически верным и рекомендуется для практического применения в лесоперерабатывающей промышленности с дальнейшим использованием для прогнозирования расчетов с помощью ML-технологий.

Список литературы

1. Божко Д. В., Божелко И. К. Оптимизация раскроя круглых лесоматериалов с использованием языка программирования Python // Лесная инженерия, материаловедение и дизайн: материалы междунар. 87-й науч.-техн. конф. профес.-преподават. состава, науч. сотрудников и аспирантов, Минск, 31 янв. –17 февр. 2023 г. Минск, 2023. С. 121–124.
2. Карпов Ю. Г. Model Checking. Верификация параллельных и распределенных программных систем. СПб.: БХВ-Петербург, 2010. 552 с.
3. Майерс Г., Сандлер К., Баджетт Т. Искусство тестирования программ. М.: Вильямс, 2012. 272 с.
4. Абрамов С. С. Методы верификации программ. М.: МЦНМО, 2001. 392 с.
5. Котляров В. П., Коликова Т. В. Основы тестирования программного обеспечения. М.: ИНТУИТ, 2009. 285 с.

6. Кобзарь А. И. Прикладная математическая статистика. Для инженеров и научных работников. М.: Физматлит, 2006. 816 с.
7. Айвазян С. А., Мхитарян В. С. Прикладная статистика и основы эконометрики. М.: ЮНИТИ, 1996. 1022 с.
8. Боровков А. А. Математическая статистика. М.: Физматлит, 2007. 704 с.
9. Плохинский Н. А. Биометрия. М.: Изд-во Моск. ун-та, 1970. 367 с.
10. Орлов А. И. Прикладная статистика. М.: Экзамен, 2006. 671 с.
11. Тюрин Ю. Н., Макаров А. А. Анализ данных на компьютере. М.: ИНФРА-М, 2003. 528 с.
12. Елисеева И. И. Статистика. М.: Юрайт, 2010. 565 с.
13. Хальд А. Математическая статистика с техническими приложениями. М.: Изд-во иностр. лит., 1956. 664 с.
14. Дрейпер Н., Смит Г. Прикладной регрессионный анализ. М.: Вильямс, 2007. 912 с.
15. Закс Л. Статистическое оценивание. М.: Статистика, 1976. 598 с.

References

1. Bazhko D. V., Bazhelka I. K. Optimizing Round Timber Cutting Using Python. *Lesnaya inzheneriya, materialovedeniye i dizayn: materialy mezhdunarodnoy 87-y nauchno-tekhnicheskoy konferentsii professorsko-prepodavatel'skogo sostava, nauchnykh sotrudnikov i aspirantov* [Forest Engineering, Materials Science and Design: materials of the interregional scientific and practical conference]. Minsk, 2023, pp. 121–124 (In Russian).
2. Karpov Yu. G. *Model Checking. Verifikatsiya parallel'nykh i raspredelennykh programmnykh system* [Model Checking. Verification of Parallel and Distributed Software Systems]. Saint Petersburg, BHV-Petersburg Publ., 2010. 552 p. (In Russian).
3. Myers G., Sandler K., Badgett T. *Iskusstvo testirovaniya programm* [The Art of Software Testing]. Moscow, Williams, 2012. 272 p. (In Russian).
4. Abramov S. S. *Metody verifikatsii programm* [Program Verification Methods]. Moscow, MTSNMO Publ., 2001. 392 p. (In Russian).
5. Kotlyarov V. P., Kolikova T. V. *Osnovy testirovaniya programmnogo obespecheniya* [Testing Computer Software]. Moscow, INTUIT Publ., 2009. 285 p. (In Russian).
6. Kobzar A. I. *Prikladnaya matematicheskaya statistika. Dlya inzhenerov i nauchnykh rabotnikov* [Applied Mathematical Statistics. For Engineers and Researchers]. Moscow, Fizmatlit, 2006. 816 p. (In Russian).
7. Ayvazyan S. A., Mkhitaryan V. S. *Prikladnaya statistika i osnovy ekonometriki* [Applied Statistics and Fundamentals of Econometrics]. Moscow, YUNITI Publ., 1998. 1022 p. (In Russian).
8. Borovkov A. A. *Matematicheskaya statistika* [Mathematical statistics]. Moscow, Fizmatlit, 2007. 704 p. (In Russian).
9. Plokhinsky N. A. *Biometriya* [Biometrics]. Moscow, Moscow University Publ., 1970. 367 p. (In Russian).
10. Orlov A. I. *Prikladnaya statistika* [Applied Statistics]. Moscow, Ekzamen, 2006. 671 p. (In Russian).
11. Tyurin Yu. N., Makarov A. A. *Analiz dannykh na komp'yutere* [Data Analysis on a Computer]. Moscow, INFRA-M Publ., 2003. 528 p. (In Russian).
12. Eliseeva I. I. *Statistika* [Statistics]. Moscow, Yurayt, 2010. 565 p. (In Russian).
13. Hald A. *Matematicheskaya statistika s tekhnicheskimi prilozheniyami* [Statistical Theory with Engineering Applications]. Moscow, Foreign Literature Publ., 1956. 669 p. (In Russian).
14. Dreyper N., Smit G. *Prikladnoy regressionnyy analiz* [Applied Regression Analysis]. Moscow, Vil'yams Publ., 2007. 912 p. (In Russian).
15. Zaks L. *Statisticheskoye otsenivaniye* [Applied Statistics]. Moscow, Statistika, 1976. 598 p. (In Russian).

Информация об авторах

Божко Данила Вячеславович – аспирант кафедры технологии деревообрабатывающих производств, экодомостроения, дизайна мебели и интерьера. Белорусский государственный технологический университет (ул. Свердлова, 13а, 220006, г. Минск, Республика Беларусь). E-mail: bozhko.tdp@mail.ru.

Божелко Игорь Константинович – кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой технологии деревообрабатывающих производств, экодомостроения, дизайна мебели и интерьера. Белорусский государственный технологический университет (ул. Свердлова, 13а, 220006, г. Минск, Республика Беларусь). E-mail: bikbstu@mail.ru. SPIN-код: 4668-7970. ResearcherID: 0000-0002-7599-6944.

Игнатович Людмила Владимировна – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры технологии деревообрабатывающих производств, экодомостроения, дизайна мебели и интерьера. Белорусский государственный технологический университет (ул. Свердлова, 13а, 220006, г. Минск, Республика Беларусь). E-mail: ignatovich@belstu.by.

Information about the authors

Bazhko Danila Vyachaslavavich – PhD student, the Department of Woodworking Technology, Eco-Housing, Furniture and Interior Design. Belarusian State Technological University (13a Sverdlova str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: bozhko.tdp@mail.ru.

Bazhelka Ihar Kanstantinavich – PhD (Engineering), Associate Professor, Head of the Department of Woodworking Technology, Eco-Housing, Furniture and Interior Design. Belarusian State Technological University (13a Sverdlova str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: bikbstu@mail.ru. SPIN code: 4668-7970. ResearcherID: 0000-0002-7599-6944.

Ignatovich Lyudmila Vladimirovna – PhD (Engineering), Associate Professor, Assistant Professor, the Department of Woodworking Technology, Eco-Housing, Furniture and Interior Design. Belarusian State Technological University (13a Sverdlova str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: ignatovich@belstu.by.

Поступила 15.10.2025