


Оригинальная статья


DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2024.1/10>

УДК 630 : 691.11



## Исследование прочности и деформативности клееных деревянных балок с ламелями из термически поврежденной древесины сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.) на основе планирования эксперимента

Владислав А. Мартынов, [martinov3369@gmail.com](mailto:martinov3369@gmail.com)  <https://orcid.org/0000-0002-6570-0265>

Даниил О. Мясников, [daniil.miasnikov.96@mail.ru](mailto:daniil.miasnikov.96@mail.ru)  <https://orcid.org/0009-0000-3999-7563>

Светлана И. Рощина , [rsi3@mail.ru](mailto:rsi3@mail.ru)  <https://orcid.org/0000-0003-0356-1383>

*Владимирский государственный университет им. А.Г. и Н.Г. Столетовых, Институт архитектуры, строительства и энергетики, ул. Горького, 87, г. Владимир, 600000, Российская Федерация*

Частично обугленная в результате лесного пожара древесина сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.) сохраняет достаточно высокие физико-механические свойства для использования в качестве конструкционного материала. Существует возможность использования такой древесины в средней части сечения клееных деревянных балок. С целью получения максимальных значений прочности и деформативности балочной конструкции сформирован многофакторный эксперимент, позволяющий определить оптимальные варьируемые факторы: место отбора древесины по высоте ствола дерева; соотношение площади поперечного сечения древесины, поврежденной огневом воздействием, к общей площади поперечного сечения клееной балки; толщина применяемых ламелей. Полученное уравнение регрессии  $\Delta Q = 38,7366 - 0,0277N - 0,0389T - 0,1283P - 0,00009NT$  адекватно по критерию Фишера  $F_p = 0,033$  при уровне значимости 5%. Условие  $F_p < F_t$  выполняется. Максимальная несущая способность клееных деревянных балок с ламелями из термически поврежденной древесины *P. sylvestris* достигается при средней плотности сырьевой древесины 471,6 кг/м<sup>3</sup>, отбираемой с комлевой части ствола, и соотношением площади поперечного сечения древесины, поврежденной огневом воздействием, к общей площади поперечного сечения клееной балки в 24% и толщине ламелей в 33 мм. Наибольшее влияние на несущую способность балочных конструкций оказывает соотношение площади поперечного сечения древесины, поврежденной огневом воздействием, к общей площади поперечного сечения клееной балки, затем толщина используемых ламелей, и наименьшее – плотность древесины в зависимости от места отбора древесины по высоте ствола.

**Ключевые слова:** *огневое воздействие древесины, деревянные балки, лесные пожары, планирование эксперимента, многофакторный эксперимент, клееные деревянные конструкции (КДК), сосна обыкновенная, Pinus sylvestris L.*

**Финансирование:** исследование выполнено при отсутствии внешнего финансирования.

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

**Конфликт интересов:** авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.


**Для цитирования:** Мартынов, В. А. Исследование прочности и деформативности клееных деревянных балок с ламелями из термически поврежденной древесины сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.) на основе планирования эксперимента / В. А. Мартынов, Д. О. Мясников, С. И. Рощина // Лесотехнический журнал. – 2024. – Т. 14. – № 1 (53). – С. 170–189. – Библиогр.: с. 186–189 (21 назв.). – DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2024.1/10>.

*Поступила* 29.12.2024. *Пересмотрена* 19.02.2024. *Принята* 02.03.2024. *Опубликована онлайн* 20.03.2024.

### Article

## Investigation of the strength and deformability of glued wooden beams with lamellas made of thermally damaged (*Pinus sylvestris* L.) wood based on experimental planning

Vladislav A. Martinov, martinov3369@gmail.com  <https://orcid.org/0000-0002-6570-0265>

Daniil O. Myasnikov, daniil.miasnikov.96@mail.ru  <https://orcid.org/0009-0000-3999-7563>

Svetlana I. Roshchina  rsi3@mail.ru  <https://orcid.org/0000-0003-0356-1383>

*Vladimir State University named after Alexander and Nikolay Stoletovs, Institute of Architecture Construction and Energy Engineering, st. Gorky, 87, Vladimir, 600000, Russia*

### Abstract

The wood of Scots pine (*Pinus sylvestris* L.), which has been partially charred due to a forest fire, exhibits sufficiently high physical and mechanical properties to be used as a structural material. This wood can be incorporated into the middle sections of glued wooden beams. In order to optimize the strength and flexibility of the beam structure, we conducted a multifactor experiment to determine the optimum variable factors: 1) the location of wood selection based on the height of the tree trunk; 2) the ratio of the cross-sectional area of fire-damaged wood to the total cross-section area of the glued beam; 3) the thickness of the laminae used based on the results of this experiment. Developed a regression equation:  $\Delta Q = 38.7366 - 0.0277 N - 0.0389 T - 0.1283 P - 0.00009 NT$ , where  $\Delta Q$  is the difference in load-carrying capacity,  $N$  is the number of tests,  $T$  is the thickness of laminae, and  $P$  is the percentage of fire-damaged wood. The resulting equation is deemed adequate based on the Fisher criterion  $F_p = 0.033$  at a 5% significance level. The condition  $F_p < F_t$  is met, indicating that the maximum bearing capacity for glued wooden beams incorporating lamellas from thermally damaged wood is *P. sylvestris* is produced with an average wood density of 471.6 kg/m<sup>3</sup> taken from the bottom of the trunk. The ratio of wood damaged by fire in the cross-section area to the overall cross-sectional area of the glueless beam is 24%, and the lamella thickness is 33 mm. The ratio of wood damaged by fire has the most significant impact on the bearing capacity of the beam structure, followed by lamella thickness, and finally wood density, which depends on the location of wood collection along the trunk height.

**Keywords:** *fire impact of wood, wooden beams, forest fires, experimental planning, multifactorial experiment, glued wood structures (GWS), Scots pine, Pinus sylvestris L.*

**Funding:** this research received no external funding.

**Acknowledgments:** Authors thank the reviewers for their contribution to the peer review.

**Conflict of interest:** the authors declare no conflict of interest.

**For citation:** Martinov V. A., Myasnikov D. O., Roshchina S. I. (2024). Investigation of the strength and deformability of glued wooden beams with lamellas made of thermally damaged (*Pinus sylvestris* L.) wood based on experimental planning. *Lesotekhnicheskii zhurnal* [Forestry Engineering journal], Vol. 14, No. 1 (53), pp. 170-189 (in Russian). DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2024.1/10>.

*Received* 29.12.2023. *Revised* 19.02.2024. *Accepted* 02.03.2024. *Published online* XX.XX.2024.

### Введение

В России расположены огромные территории лесов, простирающиеся от Западной Европы до Тихоокеанского побережья, что составляет четверть всех мировых запасов древесины (102,2 млрд м<sup>3</sup> по данным Рослесхоза). Главной проблемой сохранения естественных лесных экосистем являются лесные пожары. Ежегодно в России регистрируется от 9 тыс. до 35 тыс. лесных пожаров, охватывающих площади от 500 тыс. до нескольких млн га. [1, 8]. Одним из ключевых аспектов исследований лесов является определение технического качества древесины сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.), поврежденной термическим воздействием лесного пожара, и способах ее дальнейшего применения [2-4].

Повреждения деревьев *P. sylvestris* зависят от вида пожара и кардинально отличаются по степени поражения - от довольно незначительного до критического, что вызывает практически полное уничтожение древесины. Деревья, у которых отмечено явно выраженное изменение цвета хвои на рыжий или серый оттенок или осыпание большей части хвои, относятся лесопатологами к категории отмирающих и подлежат удалению из насаждения по требованиям санитарной безопасности [Правила санитарной безопасности в лесах РФ / Утверждены Правительством Российской Федерации 29 июня 2007 г. № 414. – 2007. – 6 с] [5-6]. При наличии таких повреждений, как ожог корневой шейки, подпалы комлевой части ствола, но при этом крона дерева не пострадала в результате пожара, жизнеспособность деревьев по внешним признакам оценить довольно проблематично [7, 10]. Как известно, поврежденное пожаром дерево теряет иммунитет, становясь более уязвимым к воздействию короедов и нашествию паразитов. Увеличивающаяся продолжительность и интенсивность последних сезонов лесных пожаров ежегодно вызывают массовое поражение миллионов деревьев,

способствуя последующей вспышке различных видов подкорковых насекомых, заражающих деревья, не затронутые пожаром [11-13].

В предыдущих исследованиях авторами статьи [1...4] было установлено, что частично обугленная древесина *P. sylvestris* сохраняет достаточно высокие физико-механические свойства, что дает возможность использовать ее как конструкционный материал. В рамках исследования возможности применения древесины, частично поврежденной термическим воздействием лесного пожара, в качестве конструкционного материала авторами предлагается использование такой древесины в средней части сечения клееных деревянных конструкций, что позволит значительно сократить использование высоко сортного пиломатериала [9].

Для достижения максимальной эффективности при проведении экспериментальных исследований необходимо моделирование многофакторного эксперимента с учетом экспериментально определенных зависимостей разрушающей нагрузки от различных факторов: место отбора древесины *P. sylvestris* по высоте ствола дерева; соотношение площади поперечного сечения поврежденной огнем воздействием древесины, используемой при изготовлении конструкции, к общей площади поперечного сечения клееной балки; толщина применяемых ламелей, а также определение оптимальных параметров для изготовления деревянных балок с использованием древесины, подвергнутой термическому воздействию.

Цель работы – выполнить планирование натурального эксперимента для определения максимальной несущей способности клееных деревянных конструкций (КДК), выполненных с применением термически поврежденной древесины *P. sylvestris*, с учетом трех различных варьируемых факторов, определенных по результатам испытания крупномасштабных моделей балок.

### Материалы и методы

Эксперимент представляет собой серию действий, которые выполняются над объектом исследования с целью сбора информации о его характеристиках. Важным аспектом обработки полученных данных является построение математической модели изучаемого явления, процесса или объекта. Такая модель может быть использована для анализа процессов и проектирования объектов. Другим аспектом обработки данных, полученных в ходе эксперимента, является задача оптимизации, или, другими словами определение наилучшего сочетания независимых факторов, при котором тот или иной решающий показатель оптимальности принимает максимальное значение.

Опыт представляет собой отдельный этап исследования, при котором проводятся эксперименты для получения данных. План эксперимента – это набор информации, который определяет количество опытов, их условия и последовательность проведения. Планирование эксперимента – это процесс выбора подходящего плана эксперимента, который соответствует поставленным требованиям (от получения априорной информации до получения работоспособной математической модели или определения оптимальных условий). Он включает в себя ряд действий, начиная от получения априорной информации и заканчивая разработкой математической модели или определением оптимальных условий.

Основной целью любого экспериментального исследования является выявление объективных закономерностей, которые отражают взаимосвязи между различными факторами. Эти закономерности имеют важное значение для управления изучаемыми процессами [17-18]. Кроме того, важно представить эту информацию в удобном и компактном виде с количественной оценкой ее точности.

В нашей практической деятельности мы часто сталкиваемся с двумя основными задачами: поиск моделей для изучаемых процессов и определение оптимальных значений параметров и функций, которые мы исследуем. Это особенно сложно, когда мы изучаем сложные явления с множеством факторов, и теоретическое решение становится проблематичным. В таких случаях мы прибегаем к проведению эксперимента с полной обработкой полученных результатов,

и это становится нашим единственным доступным инструментом.

Применение методов математического планирования эксперимента в решении данных задач позволяет достигнуть конечной цели быстро, с минимальными затратами и повышенной точностью, учитывая полное охватывание области определения исследуемой функции. В современных экспериментальных исследованиях математическая теория планирования эксперимента, основанная на теории вероятности и математической статистике, является методологической основой [14].

### *Объект и предмет исследований*

В качестве объекта исследования принята клееная деревянная балка пролетом 6.0 м сечением 140x500(h) мм, средние ламели которой предлагается заменить на термически поврежденную древесину сосны обыкновенной (*P. sylvestris L.*), а крайние ламели, где возникают максимальные растягивающие и сжимающие усилия, изготовить из древесины I сорта. Согласно ГОСТ 20850 «Конструкции деревянные клееные несущие. Общие технические условия», балки пролетом до 7,5 м относятся к классам функционального назначения 2а и 2б, что позволяет использовать при их изготовлении древесину 3-го сорта, к которому, по результатам ранее выполненных испытаний [2-4], можно отнести древесину, поврежденную огнем воздействием до 15 % от площади поперечного сечения ствола.

Предметом исследования является снижение материалоемкости КДК за счет частичного использования низкосортной древесины без снижения несущей способности балок.

### *Дизайн эксперимента*

Исследования на крупномасштабных моделях балок были проведены для получения данных о разрушающей нагрузке, которые могут быть использованы при планировании экспериментов. Авторы статьи провели широкий комплекс исследований физико-механических и прочностных свойств древесины сосны обыкновенной (*P. sylvestris L.*), которая была повреждена огнем в результате лесного пожара. Они также проанализировали механические свойства древесины, сравнивая их характеристики с эталон-

ными образцами, которые не подвергались воздействию пожара. Для этой цели были проведены экспериментальные исследования сжатия вдоль волокон и скалывания вдоль волокон стандартных образцов древесины, подвергнутых термическому повреждению [3-4, 13] стандартных образцов термически поврежденной древесины и древесины I сорта на сжатие вдоль волокон, скалывание вдоль волокон, поперечный изгиб и растяжение в соответствии с ГОСТ 16483.10-73, ГОСТ 16483.5-73\*, ГОСТ 16483.3-84, ГОСТ 16483.23-73, микроскопический анализ термически поврежденной древесины, а также испытания клеевого соединения на стойкость к температурно-влажностным воздействиям. Для комплексного изучения прочностных и физических характеристик древесины сосны, поврежденной термическим воздействием лесного пожара, были отобраны образцы деревьев из трех лесных хозяйств Якутии. Тип пожара: низовой, среднего масштаба. Отбор образцов произведен в течение двух лет, прошедших после пожара. Повреждение древостоя огненным воздействием составляло 10-15 % по поперечному сечению. Из каждого дерева были вырезаны срезы по высоте ствола. Из каждого среза образцы изготавливали по радиусу: в центре, на 0,5 радиуса (середина) и на периферии [14-15].

В ходе этих исследований были учтены факторы, которые остаются постоянными и влияют на результаты, такие как геометрические размеры балочной конструкции и применяемый клеевой состав. Склеивание ламелей крупномасштабных моделей балочных конструкций производилось клеевой системой раздельного нанесения клея и отвердителя ММФ 1255/7555 AkzoNobel Cascomin на основе меламина. Данная ММФ система (меламин, мочевины, формальдегид) является одной из самых широко используемых как в России, так и в Европе. Данная клеевая система отличается очень коротким временем прессования (от 35 минут), высокой экологичностью и безопасностью, хорошей адгезией и проникающей способностью, высокой водо- и атмосферостойкостью, что позволяет применять ее для конструкций, работающих при отрицательных температурах. Следует также отметить, что данная клеевая система обладает конкурентной стоимостью. Для оценки адгезионных свойств было исследовано качество клеевого шва в

образцах поврежденной пожаром древесины, при испытании циклическими температурно-влажностными воздействиями. Испытания клеевого соединения проводились в соответствии с ГОСТ 33121 при помощи климатической камеры КТХВ-1000. Образцы древесины последовательно подвергались замачиванию, замораживанию, оттаиванию и сушке. Механические испытания на скалывание в клеевых соединениях образцов были проведены после 40 циклов температурно-влажностных воздействий. Установлено, что разрушение всех образцов произошло не по клеевому шву, а по волокнам материала [21]. Следовательно, можно сделать вывод о достаточной адгезии термически поврежденной древесины, а также высоком качестве и прочности клеевого соединения [3-4].

В качестве варьируемых факторов приняты:

1. Фактор «ρ», кг/м<sup>3</sup> – плотность древесины в зависимости от места отбора по высоте ствола дерева (комлевая и срединная часть). Плотности и физико-механические характеристики определены по результатам испытания серии стандартных образцов, отобранных из трех срезов по высоте ствола дерева. Результаты испытания образцов из вершинной части ствола показали значительное снижение прочностных характеристик и в планировании эксперимента не учитывались [16-18]. Средняя плотность древесины при нормализованной влажности изменяется от 471,6 кг/м<sup>3</sup> (место отбора – комлевая часть) до 427,5 кг/м<sup>3</sup> (срединная часть).
2. Фактор «Т», % – учитывает соотношение площади поперечного сечения древесины, поврежденной огненным воздействием, к общей площади поперечного сечения клееной балки. Параметр изменяется в пределах от 24 до 64%.
3. Фактор «Р», мм – учитывает толщину применяемых ламелей древесины. Параметр возможных для изготовления ламелей изменяется в пределах от 32 до 50 мм [14].

Необходимо выполнение эксперимента для последовательного изучения особенностей технологии изготовления КДК и выявления влияния различных факторов на прочность и деформативность образцов (табл. 1) [19-20].

Планирование эксперимента — это процесс выбора определенного числа опытов и условий их проведения, который позволяет достичь заданной

точности в решении задачи. Однако, необходимо учитывать, что необходимо минимизировать количество опытов, чтобы сэкономить время и ресурсы. Для этого можно изменять одну или несколько переменных в каждом опыте, которые определяют исследуемое явление. Кроме того, можно использовать математический аппарат для формализации действий при проведении и обработке результатов опытов и пр. После проведения предварительных экспериментов и анализа их результатов, выбор стратегии для последующих действий становится критически важным. Это особенно актуально в задачах оптимизации, где

проводятся небольшие серии экспериментов с использованием заранее разработанного и оптимального алгоритма по определенному критерию. После каждой серии экспериментов проводится анализ полученных данных, который помогает определить дальнейшее направление поиска оптимального решения.

Исходные данные для проведения эксперимента приведены в табл. 2. Усредненные значения разрушающей нагрузки приняты по результатам испытания серии крупномасштабных моделей балочных конструкций.

Таблица 3

Планирование экспериментальных исследований на крупномасштабных моделях балки

Table 4

Design of experimental studies on large-scale beam models

| Задача серии экспериментов <br>The task of a series of experiments   | Номер серии опытов<br>(значения по 3 методам<br>расчета)  Experiment se-<br>ries number (values ac-<br>cording to 3 calculation<br>methods) | Параметры образцов <br>Sample parameters             |      |              |
|--|---|--|------|--------------|
|  |   | $\rho$ ,<br>кг/м <sup>3</sup>  <br>kg/m <sup>3</sup> | T, % | P, мм <br>mm |
| Изучение влияния места отбора древесины по высоте<br>ствола дерева Studying the influence of the location of<br>wood selection according to the height of the tree trunk   | 1   | 427,5  | 24   | 32           |
|  | 2   | 471,6  | 24   | 32           |
|  | 3   | 427,5  | 64   | 32           |
| Изучение соотношения площади поперечного сечения<br>древесины, поврежденной огнем воздействием, к об-<br>щей площади поперечного сечения  Study of the ratio of<br>the cross-sectional area of wood damaged by fire to the<br>total cross-sectional area | 4   | 471,6  | 64   | 32           |
|  | 5   | 427,5  | 24   | 50           |
|  | 6   | 471,6  | 24   | 50           |
| Исследование влияния толщины ламелей  Study of the<br>influence of the thickness of the lamellas   | 7   | 427,5  | 64   | 50           |
|  | 8   | 471,6  | 64   | 50           |

Источник: собственная композиция авторов

Source: author's composition

Исходные данные многофакторного эксперимента

Table 2

Initial data of a multifactorial experiment

| Номер серии опытов (по 3 образца в каждой серии)   Experiment series number (3 samples in each series) | Параметры образцов   Sample parameters   |      |            | Равномерно распределенная нагрузка, при которой происходит разрушение образца, Q, кН/м   Uniformly distributed load at which sample destruction occurs, Q, kN/m |                |                |                 |
|--|--|------|------------|---|----------------|----------------|-----------------|
|  | ρ, кг/м <sup>3</sup>   kg/m <sup>3</sup> | T, % | P, мм   mm | Q <sub>1</sub>  | Q <sub>2</sub> | Q <sub>3</sub> | Q <sub>ср</sub> |
| 1  | 427,5                                    | 24   | 32         | 44,62   | 45,05          | 44,20          | 44,62           |
| 2  | 471,6                                    | 24   | 32         | 45,10   | 46,26          | 45,83          | 45,73           |
| 3  | 427,5                                    | 64   | 32         | 41,56   | 41,98          | 40,78          | 41,44           |
| 4  | 471,6                                    | 64   | 32         | 43,12   | 42,42          | 42,04          | 42,53           |
| 5  | 427,5                                    | 24   | 50         | 42,36   | 41,88          | 42,63          | 42,29           |
| 6  | 471,6                                    | 24   | 50         | 43,98   | 43,06          | 43,26          | 43,43           |
| 7  | 427,5                                    | 64   | 50         | 38,88   | 39,78          | 39,10          | 39,14           |
| 8  | 471,6                                    | 64   | 50         | 39,52   | 40,14          | 40,65          | 40,10           |

Источник: собственная композиция авторов

Source: author's composition

Для того, чтобы восстановить матрицу планирования, необходимо выполнить кодирование данных эксперимента. Выполним расчёт значений верхнего уровня (ВУ), нижнего уровня (НУ), основного

уровня (ОУ) и интервал варьирования (ИВ) для каждого фактора по следующим формулам:

$$OY_i = \frac{BY_i + NY_i}{2}, \quad (1)$$

$$IB_i = BY_i - OY_i. \quad (2)$$

Таблица 3

Значения уровней факторов и интервалов варьирования

Table 3

Values of factor levels and variation intervals

| Фактор   Factor                          | ВУ   TL | НУ   LL | ОУ   ML | ИВ   VI |
|--|---------|---------|---------|---------|
| ρ, кг/м <sup>3</sup>   kg/m <sup>3</sup> | 471,6   | 427,5   | 449,55  | 22,05   |
| T, %                                     | 64      | 24      | 44      | 20      |
| P, мм   mm                               | 50      | 32      | 41      | 9       |

Источник: собственная композиция авторов

Source: author's composition

Переход к матрице планирования осуществляется путем кодирования натуральных значений параметров оптимизации. В рамках решаемой задачи имеется только один параметр оптимизации, который целесообразно обозначить как "у". Факторы будут закодированы в том же порядке, в котором они указаны в

задании:  $x_1$  соответствует плотности древесины в зависимости от места отбора по высоте ствола,  $x_2$  – поперечному сечению древесины, поврежденной огнем воздействием, к общей площади поперечного сечения клееной балки, а  $x_3$  – толщине применяемых ламелей. Матрица планирования эксперимента представлена в табл. 4.

Матрица планирования эксперимента

Table 4

Experiment planning matrix

| Матрица планирования эксперимента  Experiment planning matrix |  |      |           |  |                |                |                 |
|---|--|------|-----------|--|----------------|----------------|-----------------|
| Номер опыта  Experience number                                | Факторы  Factors                         |      |           | Параметр оптимизации  Optimization parameter |                |                |                 |
|   | ρ, кг/м <sup>3</sup>   kg/m <sup>3</sup> | Т, % | Р, мм  mm | Q, кН/м  kN/m                                |                |                |                 |
|   |  |      |           | у <sub>1</sub>                               | у <sub>2</sub> | у <sub>3</sub> | у <sub>ср</sub> |
| 1   | -  | -    | -         | 44,62  | 45,05          | 44,20          | 44,62           |
| 2   | +  | -    | -         | 45,10  | 46,26          | 45,83          | 45,73           |
| 3   | -  | +    | -         | 41,56  | 41,98          | 40,78          | 41,44           |
| 4   | +  | +    | -         | 43,12  | 42,42          | 42,04          | 42,53           |
| 5   | -  | -    | +         | 42,36  | 41,88          | 42,63          | 42,29           |
| 6   | +  | -    | +         | 43,98  | 43,06          | 43,26          | 43,43           |
| 7   | -  | +    | +         | 38,88  | 39,78          | 39,10          | 39,14           |
| 8   | +  | +    | +         | 39,52  | 40,14          | 40,65          | 40,10           |

Источник: собственная композиция авторов

Source: author's composition

Анализ данных

где n – число параллельных опытов (n=3).

Определим статистическую дисперсию опытов по формуле (3):

Корень из статистической дисперсии есть среднеквадратическое отклонение опыта или ошибка опыта.

$$S_j^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{u=1}^n (y_{ju} - \bar{y}_j)^2, \quad (3)$$

Таблица 5

Вычисление статистической дисперсии и ошибки опыта

Table 5

Calculation of statistical variance and experimental error

| Матрица планирования для 3 факторов<br>Planning matrix for 3 factors |  |      |           |  |                |                 |       | S <sub>j</sub> <sup>2</sup> | S <sub>j</sub> | S <sub>max</sub> |
|--|--|------|-----------|--|----------------|-----------------|-------|-----------------------------|----------------|------------------|
| Номер опыта  Experience number                                       | Факторы  Factors                         |      |           | Параметр оптимизации  Optimization parameter |                |                 |       |                             |                |                  |
|  | ρ, кг/м <sup>3</sup>   kg/m <sup>3</sup> | Т, % | Р, мм  mm | Q, кН/м  kN/m                                |                |                 |       |                             |                |                  |
| у <sub>1</sub>   |  |      |           | у <sub>2</sub>                               | у <sub>3</sub> | у <sub>ср</sub> |       |                             |                |                  |
| 1  | -  | -    | -         | 44,62  | 45,05          | 44,20           | 44,62 | 0,18                        | 0,43           | 0,61             |
| 2  | +  | -    | -         | 45,10  | 46,26          | 45,83           | 45,73 | 0,34                        | 0,59           |                  |
| 3  | -  | +    | -         | 41,56  | 41,98          | 40,78           | 41,44 | 0,37                        | 0,61           |                  |
| 4  | +  | +    | -         | 43,12  | 42,42          | 42,04           | 42,53 | 0,30                        | 0,55           |                  |
| 5  | -  | -    | +         | 42,36  | 41,88          | 42,63           | 42,29 | 0,14                        | 0,38           |                  |
| 6  | +  | -    | +         | 43,98  | 43,06          | 43,26           | 43,43 | 0,23                        | 0,48           |                  |
| 7  | -  | +    | +         | 38,88  | 39,78          | 39,10           | 39,14 | 0,22                        | 0,47           |                  |
| 8  | +  | +    | +         | 39,52  | 40,14          | 40,65           | 40,10 | 0,32                        | 0,57           |                  |

Источник: собственная композиция авторов

Source: author's composition



### Проверка однородности дисперсий

Для проверки однородности дисперсий используется G-критерий (критерий Кохрена). Для этого необходимо вычислить G-критерий для дисперсий, полученных в результате обработки экспериментальных данных ( $G_p$ ), и сравнить его с табличным значением G-критерия ( $G_t$ ). Если выполняется условие (4), то можно считать, что дисперсии однородны.

$$G_p < G_t. \quad (4)$$

Значение G-критерия для дисперсий, полученных в результате обработки экспериментальных данных, можно рассчитать по формуле (5)

$$G_p = \frac{S_{max}^2}{\sum_{j=1}^N S_j^2} \quad (5),$$

где  $S_{max}$  — максимальное значение из дисперсий знаменателя ( $S_{max} = 0,61$ ).

Таким образом,  $G_p = 0,1754$ .

Таблица 6

Значения критерия Кохрена (G-критерия) при 5% уровне значимости

Table 6

Values of Cochran's test (G-test) at 5% significance level

| $f_1 \backslash N$ | 1      | 2      | 3      | 4      | 5      | 6      | 7      | 8      | 9      |
|--------------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| 4                  | 0,9065 | 0,7679 | 0,6841 | 0,6287 | 0,5895 | 0,5598 | 0,5365 | 0,5175 | 0,5017 |
| 6                  | 0,7808 | 0,6161 | 0,5321 | 0,4803 | 0,4447 | 0,4184 | 0,3980 | 0,3817 | 0,3682 |
| 8                  | 0,6798 | 0,5157 | 0,4377 | 0,3910 | 0,3595 | 0,3362 | 0,3185 | 0,3043 | 0,2926 |
| 10                 | 0,6020 | 0,4450 | 0,3733 | 0,3311 | 0,3029 | 0,2823 | 0,2666 | 0,2541 | 0,2439 |
| 12                 | 0,5410 | 0,3924 | 0,3624 | 0,2880 | 0,2624 | 0,2439 | 0,2299 | 0,2187 | 0,2098 |
| 15                 | 0,4709 | 0,3346 | 0,2758 | 0,2419 | 0,2195 | 0,2034 | 0,1911 | 0,1815 | 0,1736 |
| 20                 | 0,3894 | 0,2705 | 0,2205 | 0,1921 | 0,1735 | 0,1602 | 0,1501 | 0,1422 | 0,1357 |

В таблице присутствует неизвестный параметр  $f_1$ , который представляет собой число степеней свободы и вычисляется с использованием формулы (6).

$$f_1 = n - 1. \quad (6)$$

В нашем случае, значение  $N$  равно 8, а  $f_1$  равно 2. Следовательно, выбираем значение  $G_t = 0,5157$ .

Исходя из выполнения неравенства (4) для интервала ( $0,1754 < 0,5157$ ), делаем вывод о однородности дисперсий. Таким образом, условие однородности выполняется.

### Определение ошибки эксперимента и дисперсии воспроизводимости

Ошибку эксперимента можно вычислить как корень из дисперсии воспроизводимости, используя формулу (7). В этой формуле  $N$  обозначает количество строк в матрице планирования,  $N=8$ .

$$S_y^2 = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N S_j^2 \quad (7)$$

Таким образом, получаем:  $S_y^2 = 0,2643$ ;  $S_y = 0,514$ .

### Вычисление коэффициентов регрессии

Предположим, что уравнение регрессии является линейным, и поэтому нам нужно вычислить пять коэффициентов: один из них – это свободный член ( $b_0$ ), а остальные четыре коэффициента описывают линейные эффекты. Кроме того, нам нужно определить шесть коэффициентов взаимодействия. Формула (8) используется для вычисления свободного члена, а формула (9) - для остальных коэффициентов. Формула (10) применяется для расчета коэффициентов взаимодействия.

$$b_0 = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N \bar{y}_j \quad (8),$$

$$b_j = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N x_{ij} \bar{y}_j \quad (9);$$

$$b_{uj} = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N x_{uj} x_{ij} \bar{y}_j \quad (10)$$

По результатам расчета коэффициентов регрессии получим следующие значения:

Таблица 7

Коэффициенты регрессии, отражающие линейное взаимодействие

Table 7

Regression coefficients reflecting linear interaction

| № опыта <br>Experience no. | Коэффициенты регрессии, отражающие линейное взаимодействие <br>Regression coefficients reflecting linear interaction |              |                          |              |                          |              |                          |
|----------------------------|--|--------------|--------------------------|--------------|--------------------------|--------------|--------------------------|
|                            | $b_0$  | $x_1 y_{cp}$ | $b_1$                    | $x_2 y_{cp}$ | $b_2$                    | $x_3 y_{cp}$ | $b_3$                    |
| 1                          | 42,425   | 44,62        | 0,523                    | -44,62       | -1,594                   | -44,62       | -1,155                   |
| 2                          |  | -45,73       |                          | -45,73       |                          | -45,73       |                          |
| 3                          |  | 41,44        |                          | 41,44        |                          | -41,44       |                          |
| 4                          |  | -42,53       |                          | 42,53        |                          | -42,53       |                          |
| 5                          |  | 42,29        |                          | -42,29       |                          | 42,29        |                          |
| 6                          |  | -43,43       |                          | -43,43       |                          | 43,43        |                          |
| 7                          |  | 39,25        |                          | 39,25        |                          | 39,25        |                          |
| 8                          |  | -40,10       |                          | 40,10        |                          | 40,10        |                          |
|                            | значимый <br>significant   |              | значимый <br>significant |              | значимый <br>significant |              | значимый <br>significant |

Источник: собственная композиция авторов

Source: author's composition

Таблица 8

Коэффициенты регрессии, описывающие эффекты взаимодействия

Table 8

Regression coefficients describing interaction effects

| Коэффициенты регрессии, описывающие эффекты взаимодействия <br>Regression coefficients describing interaction effects |                                 |                                 |                                 |
|---|---------------------------------|---------------------------------|---------------------------------|
| $b_{12}$  | $b_{13}$                        | $b_{23}$                        | $b_{123}$                       |
| -0,04   | -0,02                           | 0                               | -0,03                           |
| не значимый <br>not significant   | не значимый <br>not significant | не значимый <br>not significant | не значимый <br>not significant |

Источник: собственная композиция авторов

Source: author's composition

*Проверка статической значимости  
коэффициентов регрессии*

Для вычисления дисперсии коэффициента регрессии воспользуемся формулой (11):

$$S^2\{b_i\} = \frac{S_y^2}{n \cdot N} \quad (11)$$

Отсюда,  $S^2\{b_i\} = 0,011$  и  $S\{b_i\} = 0,105$ .

Чтобы определить доверительный интервал  $\Delta b_i$ , применяем формулу (12):

$$\Delta b_i = t_t \cdot S\{b_i\} \quad (12),$$

где  $t_t$  - коэффициент Стьюдента.

Для данного случая выбираем коэффициент Стьюдента (t-критерий) из таблицы для уровня значимости 5 %.

Коэффициент Стьюдента зависит от числа степеней свободы  $f_2$ , при уровне значимости 5 %:

|  |       |      |      |      |      |      |      |      |
|--|-------|------|------|------|------|------|------|------|
| Число степеней свободы  <br>Number of degrees of freedom | 1     | 2    | 3    | 4    | 5    | 6    | 7    | 8    |
| Значения t-критерия  <br>t-test values                   | 12,71 | 4,30 | 3,18 | 2,78 | 2,57 | 2,45 | 2,37 | 2,30 |
| Число степеней свободы  <br>Number of degrees of freedom | 9     | 10   | 11   | 12   | 13   | 14   | 15   | 16   |
| Значения t-критерия  <br>t-test values                   | 2,26  | 2,23 | 2,20 | 2,18 | 2,16 | 2,14 | 2,13 | 2,12 |
| Число степеней свободы  <br>Number of degrees of freedom | 17    | 18   | 19   | 20   | 21   | 22   | 23   | 24   |
| Значения t-критерия  <br>t-test values                   | 2,11  | 2,10 | 2,09 | 2,09 | 2,08 | 2,07 | 2,07 | 2,06 |
| Число степеней свободы  <br>Number of degrees of freedom | 25    | 26   | 27   | 28   | 29   | 30   | 40   | 60   |
| Значения t-критерия  <br>t-test values                   | 2,06  | 2,06 | 2,05 | 2,05 | 2,05 | 2,04 | 2,02 | 2,00 |

Определим число степеней свободы  $f_2$  по формуле (13):

$$f_2 = N(n - 1). \quad (13)$$

Исходя из этого, необходимо выбрать коэффициент Стьюдента для числа степеней свободы, близкого к  $f_2 = 16$ ;  $t_t = 2,12$ . Отсюда получаем  $\Delta b_i = 0,222$ .

Коэффициент регрессии считается значимым, если выполняется неравенство (14):

$$|b_i| > \Delta b_i. \quad (14)$$

В нашем случае, неравенство (14) выполняется для следующих найденных коэффициентов уравнения регрессии:  $b_0, b_1, b_2, b_3$ , которые и остаются в окончательном уравнении.

### *Проверка уравнения регрессии на адекватность*

В результате исключения незначимых коэффициентов регрессии полученное уравнение регрессии имеет следующий вид:

$$\tilde{y}_j = b_0 + b_1 x_{1j} + b_2 x_{2j} + b_3 x_{3j} + b_{12} x_{1j} x_{2j}. \quad (15)$$

Для проверки адекватности полученного уравнения регрессии воспользуемся критерием Фишера. Чтобы его определить, необходимо вычислить дисперсию адекватности, которая рассчитывается по формуле (16).

$$S_{ad}^2 = \frac{n}{f_3} \sum_{j=1}^N (\bar{y}_j - \tilde{y}_j)^2, \quad (16)$$

где число степеней свободы  $f_3$  рассчитывается по формуле (17)

$$f_3 = N - (k + 1), \quad (17)$$

где  $k=2$ . Отсюда  $f_3 = 8 - 3 = 5$ .

В табл. 9 приведены расчетные значения параметра оптимизации для каждой строки матрицы планирования ( $\tilde{y}_j$ ), а также средние значения этого параметра, полученные в ходе эксперимента.

Расчетные значения критерия Фишера

Table 9

Estimated values of Fisher's criterion

| Коэффициенты регрессии  Regression coefficients |       |        |        |          | Вычисление $\tilde{y}_j$  <br>Calculation $\tilde{y}_j$ | $S_{ад}^2$ | $F_p$ | $F_T$ |
|---|-------|--------|--------|----------|---|------------|-------|-------|
| $b_0$   | $b_1$ | $b_2$  | $b_3$  | $b_{12}$ |   |            |       |       |
| 42,425  | 0,523 | -1,594 | -1,155 | -0,04    | 44,6117   | 0,0086     | 0,033 | 2,85  |
| 42,425  | 0,523 | -1,594 | -1,155 | -0,04    | 45,7367   |            |       |       |
| 42,425  | 0,523 | -1,594 | -1,155 | -0,04    | 41,5017   |            |       |       |
| 42,425  | 0,523 | -1,594 | -1,155 | -0,04    | 42,4700   |            |       |       |
| 42,425  | 0,523 | -1,594 | -1,155 | -0,04    | 42,3017   |            |       |       |
| 42,425  | 0,523 | -1,594 | -1,155 | -0,04    | 43,4267   |            |       |       |
| 42,425  | 0,523 | -1,594 | -1,155 | -0,04    | 39,1917   |            |       |       |
| 42,425  | 0,523 | -1,594 | -1,155 | -0,04    | 40,1600   |            |       |       |

Источник: собственная композиция авторов

Source: author's composition

Используя данные из табл. 7, можем подставить их в уравнение (16):

$$S_{ад}^2 = 0,033 \quad (18)$$

Затем, согласно формуле (19), рассчитаем критерий Фишера:

$$F_p = \frac{S_{ад}^2}{S_y^2} \quad (19)$$

Отсюда получаем:  $F_p = 0,033$ .

Чтобы определить, является ли модель адекватной, проверим выполнение соотношения (20):

$$F_p < F_t \quad (20)$$

где  $F_t$  – табличное значение критерия Фишера, для  $F_t = 2.85$ .

Можно сделать вывод о том, что неравенство (20) выполняется ( $0,033 < 2,85$ ), следовательно, модель можно считать адекватной.

### Результаты

*Переход к уравнению регрессии в натуральных обозначениях*

По нашей текущей стадии работы получена математическая модель, которая позволяет оптимизировать параметр в кодовых обозначениях. Для продолжения обработки нам нужно перейти к использованию натуральных обозначений. Для этого необходимо воспользоваться формулой (21).

$$x_j = \frac{H_j - OY_j}{ИВ_j}, \quad (21)$$

где  $H_j$  – натуральное обозначение j-го фактора.

Подставив значения коэффициентов регрессии в уравнение (15) и сделав замену факторов в кодовых обозначениях согласно уравнению (21), мы получим:

$$y = 42,425 + 0,523x_1 + (-1,594)x_2 + (-1,155)x_3 + (-0,04)x_1x_2 \quad (22)$$

$$\Delta Q = 42,425 + 0,523 \frac{\rho - OY_\rho}{ИВ_\rho} - 1,594 \frac{T - OY_T}{ИВ_T} - 1,155 \frac{P - OY_P}{ИВ_P} - 0,04 \frac{\rho - OY_\rho}{ИВ_\rho} \cdot \frac{T - OY_T}{ИВ_T}$$

$$\Delta Q = 42,425 + 0,523 \frac{\rho - 449,55}{22,05} - 1,594 \frac{T - 44}{20} - 1,155 \frac{P - 41}{9} - 0,04 \frac{\rho - 449,55}{22,05} \cdot \frac{T - 44}{20} \quad (23)$$

В итоге получим следующее уравнение регрессии:

$$\Delta Q = 38,7366 - 0,0277\rho - 0,0389T - 0,1283P - 0,00009\rho T \quad (24)$$

С помощью полученного уравнения регрессии можно определить разрушающую нагрузку для деревянных балочных конструкций, изготовленных с применением древесины, подвергнутой термическим повреждениям, в зависимости от трех вариативных факторов. Подставив соответствующие значения этих факторов, мы сможем получить точное значение разрушающей нагрузки [19].

### Оптимизация результатов

Для того, чтобы обеспечить максимальную прочность образца, используя наименьшее количество материалов при его изготовлении, необходимо

составить таблицу, чтобы оптимизировать этот процесс.

Таблица 10

Таблица оптимизации

Table 10

Optimization table

| Описание  Description  | $\rho$ , кг/м <sup>3</sup>  <br>kg/m <sup>3</sup> | T, %   | P, мм  mm |
|--|---|--------|-----------|
| Основной уровень фактора <br>Basic factor level                                  | 449,55  | 44     | 41        |
| Коэффициент регрессии $b_i$  <br>Regression coefficient $b_i$                    | 0,523   | -1,594 | -1,155    |
| Интервал варьирования <br>Variation interval                                     | 22,05   | 10     | 9         |
| Произведение $b_i$ на ИВ $_i$   Multiplication $b_i$ on $VI_i$                   | 11,532  | -15,94 | -10,395   |
| Шаг движения по поверхности отклика  Step of movement along the response surface | 22,05   | 5      | 3         |

Источник: собственная композиция авторов

Source: author's composition

Подставляя численные значения варьируемых факторов в уравнение регрессии в интервале от нижнего (НУ) до верхнего уровня (ВУ) с шагом, равным интервалу варьирования (ИВ), приведенным в

табл. 3, получим значения равномерно распределенной нагрузки, Q, кН/м, при которой происходит разрушение образцов.

Таблица 11

Определение оптимального сочетания значений факторов

Table 11

Determination of the optimal combination of factor values

| Описание  Description  | $\rho$ | T  | P  | Q     |
|--|--------|----|----|-------|
| Округленный шаг движения по поверхности отклика  Rounded step of movement along the response surface | 1      | 5  | 3  |       |
| Мысленный опыт №1 <br>Thought Experience №1  | 427,5  | 24 | 32 | 44,61 |
| Мысленный опыт №2 <br>Thought Experience №2  | 449,55 | 24 | 32 | 45,17 |
| Мысленный опыт №3 <br>Thought Experience №3  | 471,6  | 24 | 32 | 45,73 |
| Мысленный опыт №4 <br>Thought Experience №4  | 427,5  | 29 | 35 | 43,83 |
| Мысленный опыт №5 <br>Thought Experience №5  | 449,55 | 29 | 35 | 44,38 |

| Описание  Description                         | $\rho$ | $T$ | $P$ | $Q$   |
|---|--------|-----|-----|-------|
| Мысленный опыт №6 <br>Thought Experience №6   | 471,6  | 34  | 38  | 44,14 |
| Мысленный опыт №7 <br>Thought Experience №7   | 427,5  | 34  | 38  | 43,06 |
| Мысленный опыт №8 <br>Thought Experience №8   | 449,55 | 39  | 41  | 42,82 |
| Мысленный опыт №9 <br>Thought Experience №9   | 471,6  | 39  | 41  | 43,35 |
| Мысленный опыт №10 <br>Thought Experience №10 | 427,5  | 44  | 44  | 41,51 |
| Мысленный опыт №11 <br>Thought Experience №11 | 449,55 | 44  | 44  | 42,03 |
| Мысленный опыт №12 <br>Thought Experience №12 | 471,6  | 49  | 47  | 41,76 |
| Мысленный опыт №13 <br>Thought Experience №13 | 427,5  | 49  | 47  | 40,74 |
| Мысленный опыт №14 <br>Thought Experience №14 | 449,55 | 54  | 50  | 40,46 |
| Мысленный опыт №15 <br>Thought Experience №15 | 471,6  | 59  | 50  | 40,56 |

Источник: собственная композиция авторов

Source: author's composition

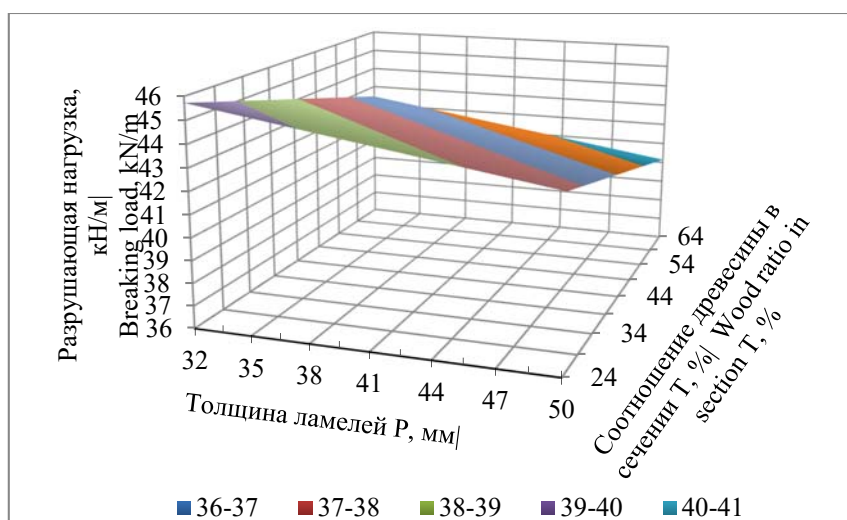


Рисунок 1. Теоретическая зависимость прочности исследуемых конструкций от факторов «Т», «Р»

Figure 1. Theoretical dependence of the strength of the structures under study on factors «T», «P»

Источник: собственная композиция авторов

Source: author's composition

Выводы: в результате планирования эксперимента получены следующие эмпирические формулы (25)...(27), на основе которых построены графики

влияния каждого фактора на прочность клееной балочной конструкции (рис. 2).

$$f(\rho) = 33,6974 - 0,0255\rho \quad (25)$$

$$f(P) = 49,8363 - 0,1283P \quad (26)$$

$$f(T) = 47,6973 - 0,0818T \quad (27)$$

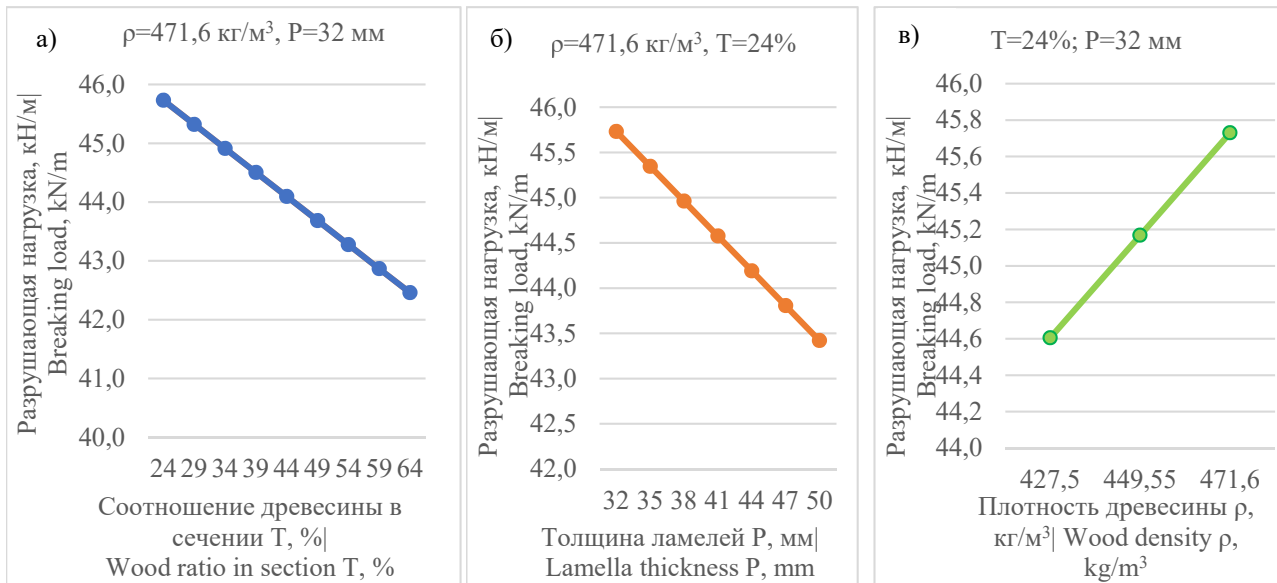


Рисунок 2. Влияние факторов «ρ», «T», «P» на прочность КДК с применением термически поврежденной древесины

Figure 2. Influence of factors «ρ», «T», «P» on the strength of LTS using thermally damaged wood

Источник: собственная композиция авторов

Source: author's composition

Графики, представленные на рис. 2, отражают степень влияния каждого фактора на прочность экспериментальных образцов. Очевидно, что наибольшее влияние оказывает соотношение термически поврежденной древесины в сечении к общей массе «T», затем толщина ламелей «P», наименьшее влияние оказывает плотность древесины «ρ».

### Обсуждение

В соответствии с поставленной целью авторами выполнено планирование многофакторного эксперимента, в результате которого получено уравнение регрессии (24), подставляя значения варьируемых факторов в которое можно определить максимальную несущую способность КДК с применением термически поврежденной древесины сосны обыкновенной (*P. sylvestris* L.) и, соответственно, оптимальные параметры для ее изготовления: средняя плотность сырьевой древесины, применяемой в качестве материала конструкции – 471,6 кг/м³. Место отбора древесины с данной плотностью – комлевая часть ствола. Оптимальное соотношение площади

поперечного сечения древесины, поврежденной огнем воздействием, к общей площади поперечного сечения клееной балки – 24%. Толщина ламелей – 32 мм. В соответствии с требованиями ГОСТ 20850-2014 и табл. 10 СП 64.13330.2017 принимаем толщину ламелей, равную 33 мм.

Фактически полученные факторы подтверждают результаты эксперимента на масштабных моделях, поскольку серия балок с таким соотношением варьируемых факторов, обеспечивающих наивысшую несущую способность, уже была изготовлена и испытана перед планированием эксперимента (серия 2 в табл. 2). Среднее значение равномерно распределенной разрушающей нагрузки составило 45,73 кН/м.

К сожалению, анализ литературных источников со схожими исследованиями не дал результатов, поскольку испытания КДК с использованием древесины сосны обыкновенной (*P. sylvestris* L.), термически поврежденной воздействием лесного пожара, до настоящего времени не проводились, поэтому сравнить результаты эксперимента с публикациями других авторов не представляется возможным.

В дальнейшем планируется изготовление и натурные испытания балочной конструкции пролетом 6,0 м сечением 140x500(h) мм с приведенными выше параметрами с целью дальнейшего внедрения термически поврежденной древесины в производство. Результаты исследований термически поврежденной древесины сосны обыкновенной (*P. sylvestris* L.) помогут сформировать строительные нормы, технические условия и практические рекомендации по расчету, проектированию и производству таких типов конструкций. Применение термически поврежденной древесины при изготовлении клееных деревянных конструкций позволит значительно сократить использование высокосортного пиломатериала при некоторых изменениях технологического процесса, не приводящих к его удорожанию, а также частично решить вопросы ресурсосбережения высокосортной древесины и снизить загрязнение окружающей среды, заключающееся в санитарной вырубке лесов после пожара.

### Заключение

На основании планирования эксперимента получено уравнение регрессии (24):

$$\Delta Q = 38,7366 - 0,0277N - 0,0389T - 0,1283P - 0,00009NT$$

Критерий адекватности Фишера  $F_p = 0,033$ . Уравнение адекватно, поскольку выполняется условие:  $F_p < F_t$ , где  $F_t$  – табличное значение критерия Фишера, для  $F_t = 2,85$ .

Уравнение регрессии описывает экспериментальные данные разрушающей экспериментальной нагрузки в зависимости от следующих вариативных факторов:

- место отбора древесины по высоте ствола дерева;
- соотношение площади поперечного сечения древесины, поврежденной огнем воздействием, к общей площади поперечного сечения клееной балки;
- толщина применяемых ламелей.

Для проведения испытаний балочных конструкций по результатам планирования эксперимента было определено оптимальное соотношение параметров, при котором достигается максимальная несущая способность конструкции:

1. Оптимальная средняя плотность сырьевой древесины, применяемой в качестве материала конструкции – 471,6 кг/м<sup>3</sup>. Место отбора древесины с данной плотностью – комлевая часть ствола;
2. Оптимальное соотношение площади поперечного сечения древесины, поврежденной огнем воздействием, к общей площади поперечного сечения клееной балки – 24 %;
3. Выбрана оптимальная толщина ламелей – 33 мм (в соответствии с требованиями ГОСТ 20850-2014 и табл. 10 СП 64.13330.2017).



### Список литературы

1. Martinov V., Lisyatnikov M., Roshchina S., Lukina A. (2024). Physical and Mechanical Properties of Coniferous Wood After Exposure to Fire. In: Proceedings of MPCPE 2022. MPCPE 2022. Lecture Notes in Civil Engineering, vol 335. Springer, Cham. [https://doi.org/10.1007/978-3-031-30570-2\\_18](https://doi.org/10.1007/978-3-031-30570-2_18).
2. Mechanical and microstructural changes in post-fire raw wood / A. Lukina [et al.] // Architecture and Engineering. – 2022. – Vol. 7, No. 3. – P. 44-52. – DOI 10.23968/2500-0055-2022-7-3-44-52. – EDN OHGQVJ. Режим доступа: <https://elibrary.ru/ohgqvj>.
3. Прочностные свойства сырой древесины после лесного пожара / А. Лукина, М. Лисятников, М. Лукин [и др.] // Гражданский журнал. – 2023. – № 3(119). – С. 11907. – DOI 10.34910/MCE.119.7. Режим доступа: <https://elibrary.ru/JIUHQK>.
4. Прочность и деформативность сырьевой древесины после огневого воздействия / А. В. Лукина [и др.], // Строительство и реконструкция. – 2022. – № 6(104). – С. 40-49. – DOI 10.33979/2073-7416-2022-104-6-40-49. Режим доступа: <https://elibrary.ru/FUHDDN>.
5. Chernykh, A. Ecological peculiarities and problems of glued timber structures reinforcement / A. Chernykh, S. Mironova, S. Mamedov // RocznikOchronaSrodowiska. – 2020. – Vol. 22, No. 1. – P. 203-213. – EDN DCNSJS.
6. Снегирева, С. Н. Исследование твердости древесины сосны, поврежденной сильным низовым и верховым пожаром / С. Н. Снегирева, А. Д. Платонов, Е. В. Кантиева // Эколого-ресурсосберегающие технологии в науке и технике : материалы Всероссийской научно-технической конференции, Воронеж, 19–20 октября 2021 года. – Воронеж: Воронежский государственный лесотехнический университет им. Г.Ф. Морозова, 2021. – С. 188-191. – DOI 10.34220/ERSTST2021\_188-191. – EDN LOJTVY.
7. Снегирева, С. Н. Твердость комлевой древесины сосны, поврежденной различными видами пожара после длительного хранения / С. Н. Снегирева, А. Д. Платонов, Е. В. Кантиева // ЗЕЛЕНАЯ ЭКОНОМИКА: "IFOREST" : Материалы международной научно-практической конференции, Воронеж, 29 сентября 2021 года. – Воронеж: Воронежский государственный лесотехнический университет им. Г.Ф. Морозова, 2021. – С. 104-108. – DOI 10.34220/ZEIF2022\_104-108. – EDN ENAPWH.
8. Density formation along the trunk radius in various wood species based on latitudinal or altitudinal zoning / A. V. Kiseleva, S. N. Snegireva, A. D. Platonov, O. A. Pinchevska // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, Voronezh, 23 октября 2020 года. – Voronezh, 2020. – P. 012055. – DOI 10.1088/1755-1315/595/1/012055. – EDN AJVFIR.
9. Lukin M, Prusov E, Roshchina S, Karelina M, Vatin N. Multi-Span Composite Timber Beams with Rational Steel Reinforcements. Buildings. 2021; 11(2):46. <https://doi.org/10.3390/buildings11020046>.
10. Kasymov, Denis & Agafontsev, Mikhail & Tarakanova, Veronika & Loboda, E & Martynov, P & Orlov, Konstantin & Reyno, Vladimir. (2021). Effect of wood structure geometry during firebrand generation in laboratory scale and semi-field experiments. Journal of Physics: Conference Series. 1867. 012020. 10.1088/1742-6596/1867/1/012020.
11. Snegireva, Svetlana & Platonov, Aleksey & Kiseleva, Aleksandra & Kantieva, Ekaterina. (2022). Variability of the hardness of pine wood damaged by strong grassroots and rampant riding fire. Forestry Engineering Journal. 11. 79-87. 10.34220/issn.2222-7962/2021.4/7.
12. Влияние пожара на толщину клеточных стенок древесины сосны / С. Н. Снегирева, А. Д. Платонов, О. М. Мазекина, Н. Г. Кеян // Перспективные ресурсосберегающие технологии развития лесопромышленного комплекса : Материалы Международной научно-практической конференции молодых ученых и студентов, Воронеж, 29 сентября 2023 года. – Воронеж: Воронежский государственный лесотехнический университет им. Г.Ф. Морозова, 2023. – С. 240-242. – DOI 10.58168/R-STD TIC2023\_240-242. – EDN WZCXVO.
13. Strength properties of raw wood after a wildfire / A. Lukina, M. Lisyatnikov, M. Lukin [et al.] // Magazine of Civil Engineering. – 2023. – No. 3(119). – P. 11907. – DOI 10.34910/MCE.119.7. Режим доступа: <https://elibrary.ru/item.asp?id=53806550>.

14. Griбанov, A. S. Experimental investigations of composite wooden beams with local wood modification / A. S. Griбанov, V. I. Rimshin, S. I. Roshchina // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering : International Conference on Construction, Architecture and Technosphere Safety, Chelyabinsk, 25–27 сентября 2019 года. Vol. 687, 3. – Chelyabinsk: Institute of Physics Publishing, 2019. – P. 033039. – DOI 10.1088/1757-899X/687/3/033039. Режимдоступа: <https://elibrary.ru/item.asp?id=43233459>.

15. Влагодроводность древесины сосны, поврежденной пожаром, при атмосферной сушке / А. Д. Платонов, С. Н. Снегирева, Е. В. Кантиева [и др.] // Перспективные ресурсосберегающие технологии развития лесопромышленного комплекса : Материалы Международной научно-практической конференции молодых ученых и студентов, Воронеж, 29 сентября 2023 года. – Воронеж: Воронежский государственный лесотехнический университет им. Г.Ф. Морозова, 2023. – С. 126-129. – DOI 10.58168/R-STDTC2023\_126-129. – EDN DEFNQF.

16. Löf, Magnus & Madsen, Palle & Metslaid, Marek & Witzell, Johanna & Jacobs, Douglass. (2019). Restoring forests: regeneration and ecosystem function for the future. *New Forests*. 50. 139-151. 10.1007/s11056-019-09713-0.

17. Ковтун, И. Ю. Механизм изменения физико-механических свойств древесины при различных температурах и времени термообработки / И. Ю. Ковтун, А. З. Мальцева // Матрица научного познания. – 2021. – № 11-2. – С. 45-50. Режимдоступа: <https://elibrary.ru/item.asp?id=47276526>.

18. Федотов, И. О. Параметры обугливания древесины с огнезащитой для расчетной методики оценки пределов огнестойкости деревянных конструкций / И. О. Федотов, П. В. Халепа, А. Б. Сивенков // Актуальные проблемы и инновации в обеспечении безопасности : Сборник материалов Дней науки с международным участием, Екатеринбург, 06–10 декабря 2021 года / Уральский институт ГПС МЧС России. Том Часть 1. – Екатеринбург: Уральский институт Государственной противопожарной службы МЧС России, 2022. – С. 262-266. Режимдоступа: <https://elibrary.ru/IQGDAG>.

19. Sergeev, Michail & Lukin, M & Strekalkin, A & Roshchina, Svetlana. (2021). Mathematical modeling of stress-strain state of the nodal joint of wooden beams. *Journal of Physics: Conference Series*. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2131/3/032088>.

20. Zaytsev, D. A. Wood density of pine and spruce stands according to trees diameter distribution after thinning / D. A. Zaytsev, D. A. Danilov, S. V. Navalihin // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science : International Jubilee Scientific and Practical Conference "Innovative Directions of Development of the Forestry Complex (FORESTRY-2018)", Voronezh, 04–05 октября 2018 года. Vol. 226, conference 1. – Institute of Physics Publishing: Institute of Physics Publishing, 2019. – P. 012065. – DOI 10.1088/1755-1315/226/1/012065. – EDN WUMJQN.

21. Технология изготовления клееных деревянных конструкций с применением древесины, поврежденной огнем воздействием лесного пожара / В. А. Мартынов, М. С. Лисятников, А. В. Лукина, С. И. Рощина // Лесотехнический журнал. – 2023. – Т. 13, № 4(52). – С. 158-177. – DOI 10.34220/issn.2222-7962/2023.4/10. – EDN ZIBLMX.

### References

1. Martinov, V., Lisyatnikov, M., Roshchina, S., Lukina, A. (2024). Physical and Mechanical Properties of Coniferous Wood After Exposure to Fire. In: Vatin, N., Roshchina, S., Serdjuks, D. (eds) *Proceedings of MPCPE 2022. MPCPE 2022. Lecture Notes in Civil Engineering*, vol 335. Springer, Cham. [https://doi.org/10.1007/978-3-031-30570-2\\_18](https://doi.org/10.1007/978-3-031-30570-2_18).

2. Mechanical and microstructural changes in post-fire raw wood / A. Lukina, M. Lisyatnikov, V. Martinov [et al.] // *Architecture and Engineering*. – 2022. – Vol. 7, No. 3. – P. 44-52. – DOI 10.23968/2500-0055-2022-7-3-44-52. – EDN OHGQVJ. Режимдоступа: <https://elibrary.ru/ohgqvj>.

3. Strength properties of raw wood after a forest fire / A. Lukina, M. Lisyatnikov, M. Lukin [et al.] // *Civil Journal*. – 2023. – № 3(119). – P. 11907. – DOI 10.34910/MCE.119.7. Access mode: <https://elibrary.ru/JIUHQK>.

4. Strength and deformability of raw wood after fire exposure / A.V. Lukina, M. S. Lisyatnikov, V. A. Martynov, S. I. Roshchina // Construction and reconstruction. – 2022. – № 6(104). – Pp. 40-49. – DOI 10.33979/2073-7416-2022-104-6-40-49. Access mode: <https://elibrary.ru/FUHDDN> .
5. Chernykh, A. Ecological peculiarities and problems of glued timber structures reinforcement / A. Chernykh, S. Mironova, S. Mamedov // RocznikOchronaSrodowiska. – 2020. – Vol. 22, No. 1. – P. 203-213. – EDN DCNSJS.
6. Snegireva, S. N. Investigation of the hardness of pine wood damaged by a strong grassroots and upper fire / S. N. Snegireva, A.D. Platonov, E. V. Kantieva // Ecological and resource-saving technologies in science and technology : materials of the All-Russian Scientific and Technical Conference, Voronezh, October 19-20, 2021. – Voronezh: Voronezh State Forestry Engineering University named after G.F. Morozov, 2021. – pp. 188-191. – DOI 10.34220/ERSTST2021\_188-191. – EDN LOJTVY.
7. Snegireva, S. N. Hardness of lumpy pine wood damaged by various types of fire after long-term storage / S. N. Snegireva, A.D. Platonov, E. V. Kantieva // GREEN ECONOMY: "IFOREST" : Materials of the international scientific and practical conference, Voronezh, September 29, 2021. – Voronezh: Voronezh State Forestry Engineering University named after G.F. Morozov, 2021. – pp. 104-108. – DOI 10.34220/ZEIF2022\_104-108. – EDN ENAPWH.
8. Density formation along the trunk radius in various wood species based on latitudinal or altitudinal zoning / A. V. Kiseleva, S. N. Snegireva, A. D. Platonov, O. A. Pinchevska // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, Voronezh, 23 октября 2020 года. – Voronezh, 2020. – P. 012055. – DOI 10.1088/1755-1315/595/1/012055. – EDN AJVFIR.
9. Lukin M, Prusov E, Roshchina S, Karelina M, Vatin N. Multi-Span Composite Timber Beams with Rational Steel Reinforcements. Buildings. 2021; 11(2):46. <https://doi.org/10.3390/buildings11020046>.
10. Kasymov, Denis & Agafontsev, Mikhail & Tarakanova, Veronika & Loboda, E & Martynov, P & Orlov, Konstantin & Reyno, Vladimir. (2021). Effect of wood structure geometry during firebrand generation in laboratory scale and semi-field experiments. Journal of Physics: Conference Series. 1867. 012020. 10.1088/1742-6596/1867/1/012020.
11. Snegireva, Svetlana & Platonov, Aleksey & Kiseleva, Aleksandra & Kantieva, Ekaterina. (2022). VARIABILITY OF THE HARDNESS OF PINE WOOD DAMAGED BY STRONG GRASSROOTS AND RAMPANT RIDING FIRE. Forestry Engineering Journal. 11. 79-87. 10.34220/issn.2222-7962/2021.4/7.
12. The effect of fire on the thickness of the cell walls of pine wood / S. N. Snegireva, A.D. Platonov, O. M. Mazekina, N. G. Keyan // Promising resource-saving technologies for the development of the timber industry : Materials of the International Scientific and Practical Conference of Young Scientists and Students, Voronezh, September 29, 2023. – Voronezh: Voronezh State Forestry Engineering University named after G.F. Morozov, 2023. – pp. 240-242. – DOI 10.58168/R-STD TIC2023\_240-242. – EDN WZCXVO.
13. Strength properties of raw wood after a wildfire / A. Lukina, M. Lisyatnikov, M. Lukin [et al.] // Magazine of Civil Engineering. – 2023. – No. 3(119). – P. 11907. – DOI 10.34910/MCE.119.7. Режим доступа: <https://elibrary.ru/item.asp?id=53806550>.
14. Griбанov, A. S. Experimental investigations of composite wooden beams with local wood modification / A. S. Griбанov, V. I. Rimshin, S. I. Roshchina // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering : International Conference on Construction, Architecture and Technosphere Safety, Chelyabinsk, 25–27 сентября 2019 года. Vol. 687, 3. – Chelyabinsk: Institute of Physics Publishing, 2019. – P. 033039. – DOI 10.1088/1757-899X/687/3/033039. Режим доступа: <https://elibrary.ru/item.asp?id=43233459>.
15. Moisture conductivity of pine wood damaged by fire during atmospheric drying / A.D. Platonov, S. N. Snegireva, E. V. Kantieva [et al.] // Promising resource-saving technologies for the development of the timber industry complex : Materials of the International Scientific and practical Conference of Young Scientists and Students, Voronezh, September 29, 2023. – Voronezh: Voronezh State Forestry Engineering University named after G.F. Morozov, 2023. – pp. 126-129. – DOI 10.58168/R-STD TIC2023\_126-129. – EDN DEFNQF.
16. Löf, Magnus & Madsen, Palle & Metslaid, Marek & Witzell, Johanna & Jacobs, Douglass. (2019). Restoring forests: regeneration and ecosystem function for the future. New Forests. 50. 139-151. 10.1007/s11056-019-09713-0.

17. Kovtun, I. Yu. The mechanism of changing the physical and mechanical properties of wood at different temperatures and heat treatment time / I. Yu. Kovtun, A. Z. Maltseva // The matrix of scientific knowledge. – 2021. – No. 11-2. – pp. 45-50. Access mode: <https://elibrary.ru/item.asp?id=47276526> .

18. Fedotov, I. O. Parameters of wood charring with fire protection for the calculation methodology for assessing the fire resistance limits of wooden structures / I. O. Fedotov, P. V. Halepa, A. B. Sivenkov // Actual problems and innovations in safety : Collection of materials of the Days of Science with international participation, Yekaterinburg, December 06-10, 2021 / Ural Institute of GPS of the Ministry of Emergency Situations of Russia. Volume Part 1. – Yekaterinburg: Ural Institute of the State Fire Service of the Ministry of Emergency Situations of Russia, 2022. – pp. 262-266. Access mode: <https://elibrary.ru/IQGDAG>.

19. Sergeev, Michail & Lukin, M & Strekalkin, A & Roshchina, Svetlana. (2021). Mathematical modeling of stress-strain state of the nodal joint of wooden beams. Journal of Physics: Conference Series. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2131/3/032088>.

20. Zaytsev, D. A. Wood density of pine and spruce stands according to trees diameter distribution after thinning / D. A. Zaytsev, D. A. Danilov, S. V. Navalihin // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science : International Jubilee Scientific and Practical Conference "Innovative Directions of Development of the Forestry Complex (FORESTRY-2018)", Voronezh, 04–05 октября 2018 года. Vol. 226, conference 1. – Institute of Physics Publishing: Institute of Physics Publishing, 2019. – P. 012065. – DOI 10.1088/1755-1315/226/1/012065. – EDN WUMJQN.

21. Technology for the manufacture of laminated timber structures using wood damaged by the fire of a forest fire / V. A. Martynov, M. S. Lisyatnikov, A. V. Lukina, S. I. Roshchina // Forestry Journal. – 2023. – Т. 13, No. 4(52). – pp. 158-177. – DOI 10.34220/issn.2222-7962/2023.4/10. – EDN ZIBLMX.

### Сведения об авторах

*Мартынов Владислав Алексеевич* – ассистент кафедры строительных конструкций, Институт архитектуры, строительства и энергетики, ФГБОУ ВО «Владимирский государственный университет имени А.Г. и Н.Г. Столетовых» (ВлГУ), ул. Горького, 87, г. Владимир, Российская Федерация, 600000, <http://orcid.org/0000-0002-6570-0265>, e-mail: [martynov3369@gmail.com](mailto:martynov3369@gmail.com).

*Мясников Даниил Олегович* – инженер кафедры строительных конструкций, Институт архитектуры, строительства и энергетики, ФГБОУ ВО «Владимирский государственный университет имени А.Г. и Н.Г. Столетовых» (ВлГУ), ул. Горького, 87, г. Владимир, Российская Федерация, 600000, <https://orcid.org/0009-0000-3999-7563>, e-mail: [daniil.miasnikov.96@mail.ru](mailto:daniil.miasnikov.96@mail.ru).

✉ *Рощина Светлана Ивановна* – д.т.н., проф., зав. кафедрой строительных конструкций, Институт архитектуры, строительства и энергетики, ФГБОУ ВО «Владимирский государственный университет имени А.Г. и Н.Г. Столетовых» (ВлГУ), ул. Горького, 87, г. Владимир, Российская Федерация, 600000, <http://orcid.org/0000-0003-0356-1383>, e-mail: [rsi3@mail.ru](mailto:rsi3@mail.ru).

### Information about the authors

*Vladislav A. Martinov* – assistant of the Department of Civil Engineering, Institute of Architecture, Construction and Energy, Vladimir State University. A.G. and N.G. Stoletovs (VIGU), Gorky street, 87, Vladimir, Russian Federation, 600000, <http://orcid.org/0000-0002-6570-0265>, e-mail: [martynov3369@gmail.com](mailto:martynov3369@gmail.com).

*Daniil O. Miasnikov* – Engineer of the Department of Building Structures, Institute of Architecture, Construction and Energy, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education “Vladimir State University named after. A.G. and N.G. Stoletovykh” (VISU), st. Gorky, 87, Vladimir, Russian Federation, 600000, <https://orcid.org/0009-0000-3999-7563>, e-mail: [daniil.miasnikov.96@mail.ru](mailto:daniil.miasnikov.96@mail.ru).

✉ *Svetlana I. Roshchina* – Doctor of Technical Sciences, Prof., Head. Department of Civil Engineering, Institute of Architecture, Construction and Energy, Vladimir State University. A.G. and N.G. Stoletovs (VIGU), Gorky street, 87, Vladimir, 600000, Russian Federation, <http://orcid.org/0000-0003-0356-1383>, e-mail: [rsi3@mail.ru](mailto:rsi3@mail.ru).

✉ – Для контактов/Corresponding author