

DOI: 10.15393/j2.art.2025.8623

УДК 624.011.1

Статья

Моделирование влияния биоповреждений древесины на несущую способность конструкций исторических зданий

Гаврилов Тиммо Александрович

кандидат технических наук, доцент, Петрозаводский государственный университет
(Российская Федерация), gavrilov@petrstu.ru

Получена: 6 мая 2025 / Принята: 30 октября 2025 / Опубликовано: 4 ноября 2025

Аннотация: Элементы деревянных конструкций исторических зданий в ходе эксплуатации подвергаются биоповреждениям. Основной причиной биоповреждений является жизнедеятельность дереворазрушающих грибов и насекомых. В процессе биоповреждения в древесине образуются пустоты и неоднородности, которые могут приводить к снижению несущей способности элементов деревянных конструкций исторических зданий, что является актуальной проблемой. Целью исследования является построение обобщённой модели изменения несущей способности элементов деревянных конструкций исторических зданий в зависимости от количества и направления биоповреждений. В статье описываются методика и результаты испытания образцов и конечно-элементного анализа моделей элементов деревянных конструкций с варьируемым количеством и направлением искусственных биоповреждений. В ходе исследования выявлено, что степень деградации несущей способности элементов деревянных конструкций исторических зданий зависит от величины, количества и направления биоповреждений. Предложена обобщённая модель изменения несущей способности элементов деревянных конструкций исторических зданий в зависимости от величины биоповреждений, их количества и угла наклона. Выявлено, что наибольшую опасность для сохранности элементов деревянных конструкций исторических зданий, подверженных сжатию вдоль волокон древесины, представляют биоповреждения, направленные перпендикулярно направлению сжимающей нагрузки. При исчерпании несущей способности элементов деревянных конструкций с биоповреждениями, направленными перпендикулярно сжимающей нагрузке, в них возникают поперечные трещины. Причиной возникновения трещин являются растягивающие напряжения, концентрирующиеся в областях около биоповреждений и превышающие допустимые.

Они приводят к отрыву частиц элементов деревянных конструкций друг от друга, в связи с этим биоповреждения играют роль концентраторов напряжений. Перспективой дальнейшего исследования является изучение закономерностей влияния биоповреждений на элементы деревянных конструкций исторических зданий, подверженных сжатию поперёк волокон древесины.

Ключевые слова: исторические здания; биоповреждение; древесина; механическая прочность; дереворазрушающие грибы; дереворазрушающие насекомые

DOI: 10.15393/j2.art.2025.8623

Article

Modeling the influence of wood bio-damage on the load-bearing capacity of historical buildings structures

Timmo Gavrilov

*Ph. D. in engineering, associate professor, Petrozavodsk State University
(Russian Federation), gavrilov@petsu.ru*

Received: 6 May 2025 / Accepted: 30 October 2025 / Published: 4 November 2025

Abstract: Wooden structures elements of historical buildings are subjected to bio-damage during operation. The main cause of bio-damage is the activity of wood-destroying fungi and insects. In the process of bio-damage in wood voids and inhomogeneities are formed, which may lead to a decrease in the load-bearing capacity of historic buildings wooden structures elements. The aim of the study was to build a generalized model of the change in the load-bearing capacity of wooden structures elements depending on the change in the number and direction of bio-damage. The article describes the methodology and results of specimens testing and finite element analysis of wooden structures elements models with different number and direction of artificial bio-damage. The research revealed that the degradation degree of load-bearing capacity of these elements depended on the magnitude, quantity and direction of bio-damage. A generalized model of changes in the load-bearing capacity of wooden structures elements depending on the bio-damage magnitude, their number and angle of inclination is proposed. It has been revealed that the greatest danger for the preservation of historical buildings wooden structures elements subjected to compression along the wood fibers was posed by bio-damage directed perpendicular to the direction of compressive load. Exhaustion of the load-bearing capacity of the wooden structures elements with bio-damage directed perpendicular to the compressive load resulted in transverse cracks. Cracking was caused by tensile stresses concentrated in areas near the bio-damage and exceeding the allowable stresses. They caused particles of wooden structures elements to separate from each other. In this regard, bio-damage played the role of stress concentrators. The prospect for further research is to study the regularities of the influence of bio-damage on the historical buildings wooden structures elements subjected to compression across the wood fibers.

Keywords: historical buildings; bio-damage; wood; mechanical strength; wood-destroying fungi; wood-destroying insects

1. Введение

Исторически во многих странах мира основным строительным материалом являлась древесина, наибольший размах строительство из древесины получило в России. Причиной этого является обилие и доступность строительного леса, его возобновляемость, а также относительная лёгкость обработки древесины. Деревянное строительство в течение многих веков носило массовый характер, из древесины строили жилища, храмы, крепостные стены, башни, мосты и набережные [1], [2]. Многие сохранившиеся до наших дней исторические здания и сооружения из древесины имеют важное культурное значение и отнесены к памятникам архитектуры.

Элементы деревянных конструкций исторических зданий в ходе эксплуатации подвергаются биоповреждениям. Основной причиной биоповреждений является жизнедеятельность дереворазрушающих грибов и насекомых [3—5]. В процессе биоповреждения в древесине образуются пустоты и неоднородности, снижающие несущую способность элементов деревянных конструкций исторических зданий, что является актуальной проблемой, требующей решения.

Вопросам изменения несущей способности элементов деревянных конструкций посвящены работы ряда авторов [6—16]. Так, в работах [6], [7] рассматривается потеря несущей способности деревьев из-за гниения или пустот в их стволах с использованием данных томографической визуализации в сочетании с известными уравнениями, а также статических нагрузочных испытаний и ультразвуковой томографии; в работе [8] описывается лабораторное исследование изменения прочностных характеристик образцов прямых соединений «паз-шип» деревянных зданий, инкубированных с грибами, вызывающими гниение древесины; в работах [9], [10] изучается влияние бурой гнили на состав гемицеллюлозы и взаимосвязь бурой гнили с механическими свойствами древесины; в работе [11] описываются результаты исследования изменения механических свойств древесины при поражении её белой гнилью; в работе [12] приводятся результаты исследования влияния биологической ферментативной обработки на физические и механические свойства древесно-полимерных композитов, поражённых плесенью; в работе [13] приведены результаты лабораторных испытаний на сжатие образцов древесины, повреждённой дереворазрушающими насекомыми; в работах [14], [15] даётся оценка влияния биodeградации древесины исторических зданий под действием насекомых на её несущую способность; в работе [16] описываются результаты исследования изменения механических свойств древесины мёртвых деревьев, поражённых жуками-короедами.

В большинстве существующих исследований, посвящённых влиянию биоповреждений на прочностные характеристики элементов деревянных конструкций, строго прослеживается дифференциация видов биоразрушителей, пород деревьев и природно-климатических условий. Данная дифференциация не позволяет построить общую модель процесса биоразрушения элементов деревянных конструкций исторических зданий и изменения

их несущей способности, что является существенной проблемой для разработки универсальных подходов расчёта, моделирования и прогнозирования несущей способности элементов деревянных конструкций в процессе их биоразрушения. Решение данной проблемы возможно посредством интегрированного подхода в изучении влияния биоповреждений на несущую способность элементов деревянных конструкций, включающего построение модели со смещением фокуса с причины и условий биоразрушения на геометрические характеристики биоразрушений элементов деревянных конструкций. В связи с этим целью данного исследования является построение обобщённой модели изменения несущей способности элементов деревянных конструкций исторических зданий в зависимости от количества и направления биоповреждений.

2. Материалы и методы

2.1. Эксперимент

Для изучения влияния биоповреждений на механические свойства элементов деревянных конструкций исторических зданий были изготовлены образцы из древесины сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.) в виде прямоугольных параллелепипедов с размерами $40 \times 40 \times 40$ мм с отверстиями, расположенными вдоль и поперёк волокон древесины (т. е. параллельно и перпендикулярно сжимающей нагрузке), диаметром 4 мм, имитирующими биоповреждения. Количество отверстий варьировалось от 0 до 8 шт. Испытания образцов проводились в соответствии с ГОСТ 16483.10-73 «Древесина. Методы определения предела прочности при сжатии вдоль волокон» и международным стандартом ISO 13061-1:2014 на универсальной испытательной машине Shimadzu AGX300. В ходе испытаний образцы сжимались вдоль волокон древесины при контролируемой скорости перемещения 10 мм/мин до появления в них трещин. Процесс испытаний показан на фото 1.



Фото 1. Процесс испытаний образцов [фото автора]

Photo 1. Samples test process

2.2. Моделирование

Моделирование влияния биоповреждений на механические свойства элементов деревянных конструкций исторических зданий осуществлялось посредством конечно-элементного анализа. Элементы деревянных конструкций исторических зданий моделировались с помощью трёхмерных твердотельных элементов. Древесина моделировалась как ортотропный линейно-упругий материал, учитывающий её свойства в радиальном, тангенциальном и продольном направлениях [17], [18]. Модели имели форму прямоугольных параллелепипедов с размерами $40 \times 40 \times 40$ мм с отверстиями диаметром 4 мм, расположенными параллельно и перпендикулярно сжимающей нагрузке. Количество отверстий варьировалось от 0 до 8 шт. Сжимающая нагрузка была направлена вдоль волокон древесины. Конечно-элементные модели образцов показаны на рисунке 1.

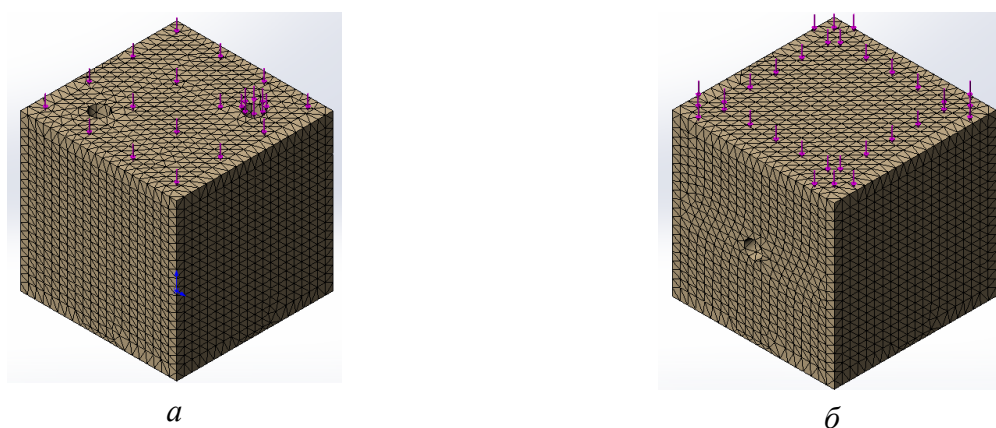


Рисунок 1. Конечно-элементные модели образцов: *а* — с отверстиями параллельно сжимающей нагрузке, *б* — с отверстием перпендикулярно сжимающей нагрузке [рисунок автора]

Figure 1. Samples finite element models: (a) with holes parallel to the compressive load, (b) with holes perpendicular to the compressive load

3. Результаты

На фото 2 показаны образцы без отверстий после испытаний.



Фото 2. Образцы без отверстий после испытаний [рисунок автора]

Photo 2. Samples without holes after testing

На фото 3 показаны образцы с отверстиями, расположенными параллельно сжимающей нагрузке, после испытаний.

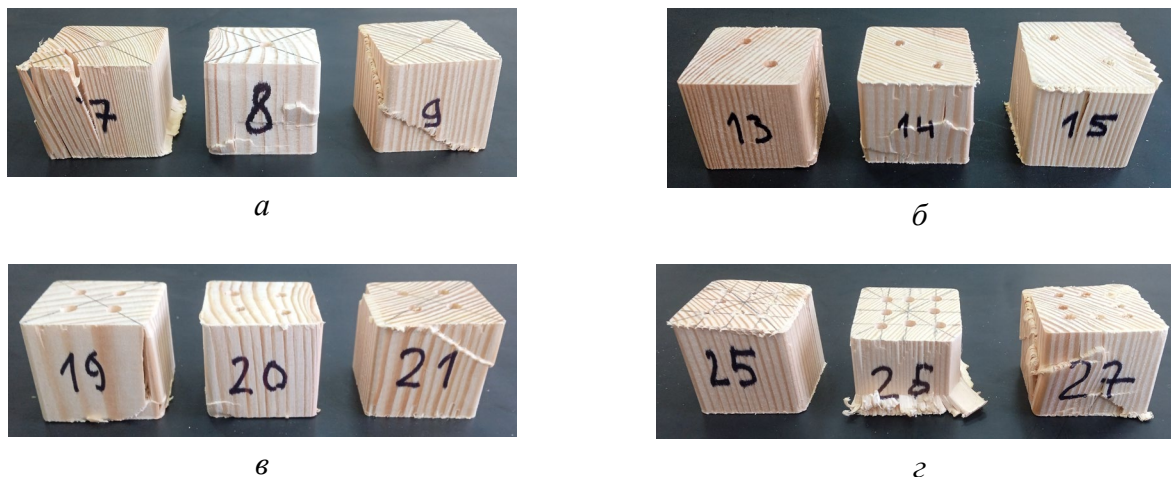


Фото 3. Образцы с отверстиями, расположенными параллельно сжимающей нагрузке, после испытаний: *a* — с одним отверстием, *б* — с двумя отверстиями, *в* — с четырьмя отверстиями, *г* — с восемью отверстиями [рисунок автора]

Photo 3. Samples with holes parallel to the compressive load after testing: **(a)** with one hole, **(b)** with two holes, **(c)** with four holes, **(d)** with eight holes

На фото 4 показаны образцы с отверстиями, расположенными перпендикулярно сжимающей нагрузке, после испытаний.

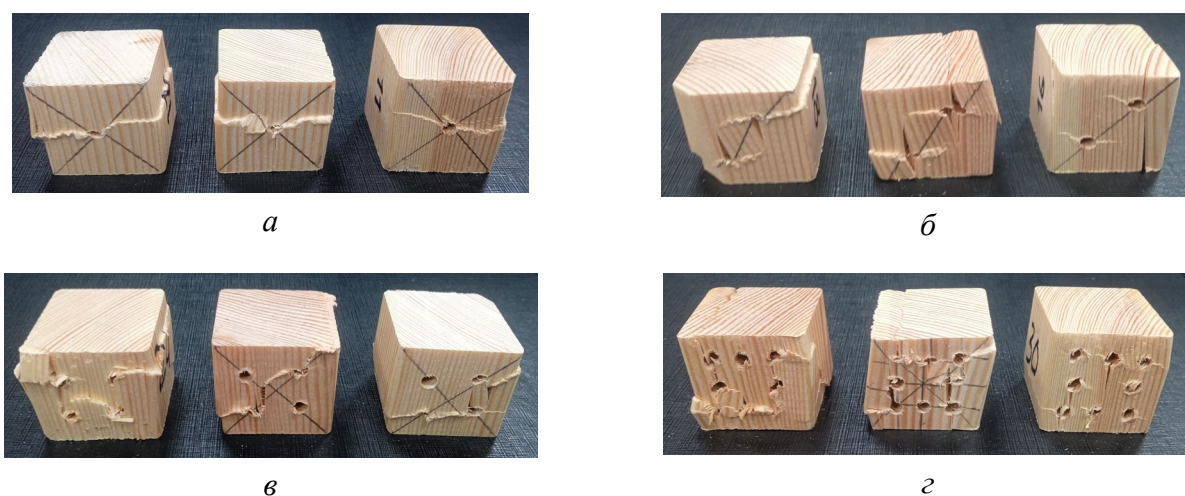


Фото 4. Образцы с отверстиями, расположенными перпендикулярно сжимающей нагрузке, после испытаний: *a* — с одним отверстием, *б* — с двумя отверстиями, *в* — с четырьмя отверстиями, *г* — с восемью отверстиями [рисунок автора]

Photo 4. Samples with holes perpendicular to the compressive load after testing: **(a)** with one hole, **(b)** with two holes, **(c)** with four holes, **(d)** with eight holes

Для каждого образца были получены диаграммы сжатия образцов с осями «нагрузка (F) – перемещение (u)» (рисунок 2), по которым были определены значения несущей способности образцов, которые были обработаны общепринятыми методами математической статистики и представлены в таблице.

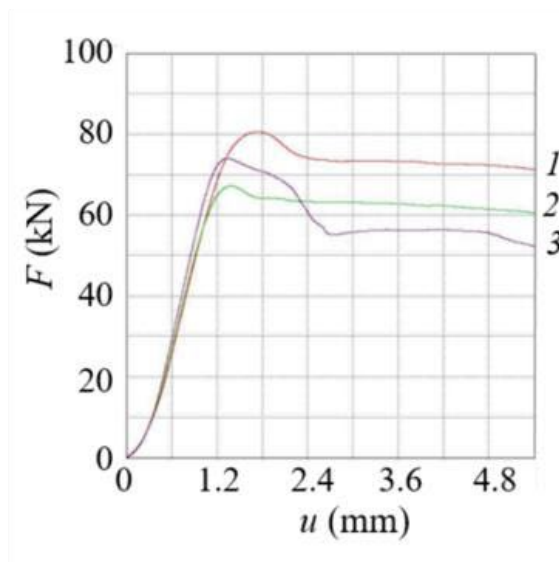


Рисунок 2. Экспериментальные кривые «нагрузка — перемещение» для образцов [рисунок автора]

Figure 2. Experimental «load-displacement» curves for samples

Таблица. Изменение несущей способности образцов без отверстий и с отверстиями

Table. Change of load-bearing capacity of samples without holes and with holes

Количество отверстий, шт.	Несущая способность образцов, кН	
	с отверстиями параллельно сжимающей нагрузке	с отверстиями перпендикулярно сжимающей нагрузке
0	84,171	84,171
1	83,842	75,917
2	83,755	64,975
4	83,366	61,502
8	82,762	51,605

Характер распределения напряжений в образцах без отверстий и с отверстиями был определён в ходе конечно-элементного анализа их моделей. На рисунках 3 и 4 представлены эпюры распределения первых главных и касательных напряжений моделей образцов без отверстий и с отверстиями, расположенными параллельно сжимающей нагрузке.

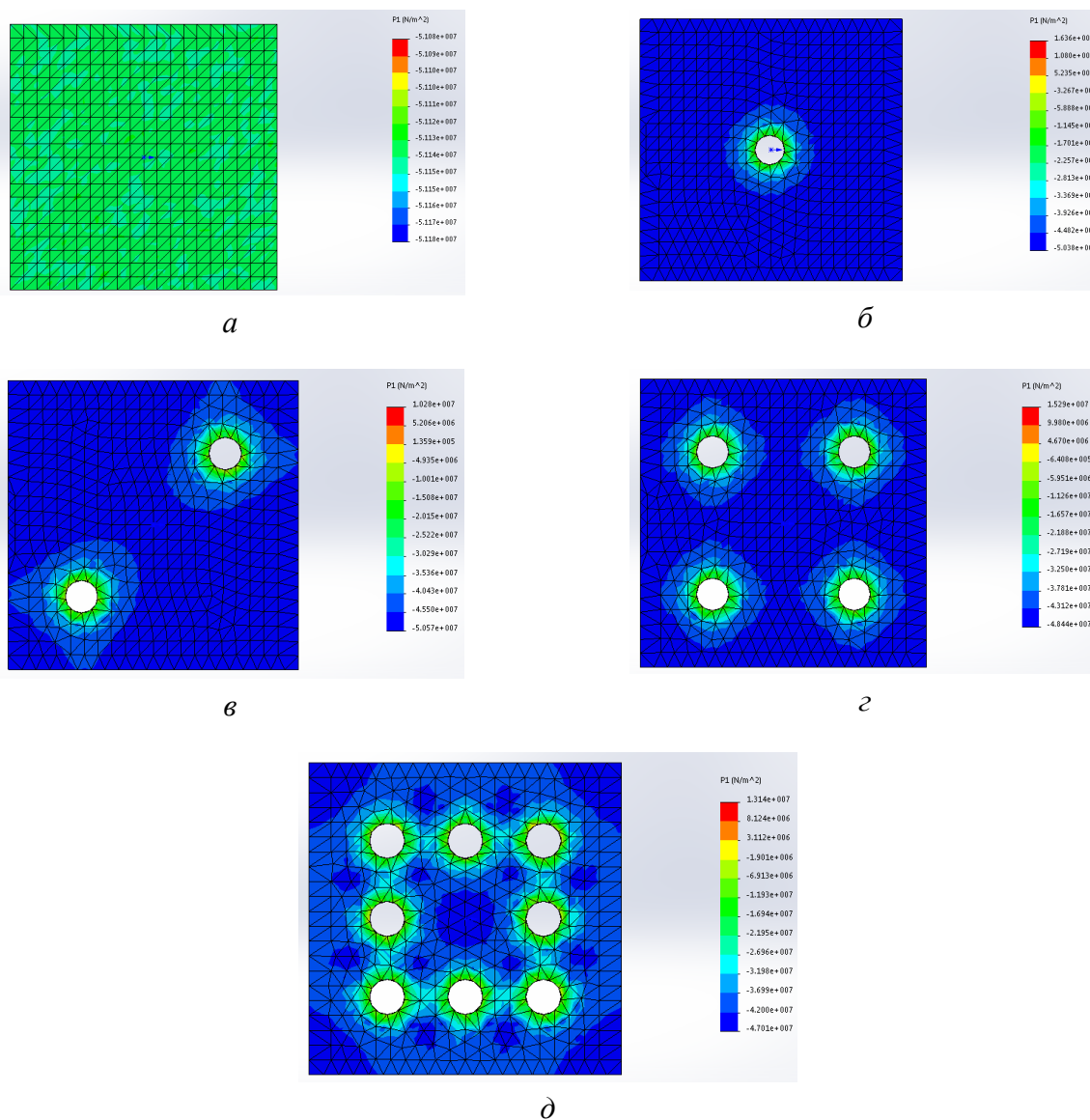


Рисунок 3. Эпюры первых главных напряжений образцов с отверстиями, расположенными параллельно сжимающей нагрузке (вид сверху): *a* — без отверстий, *б* — с одним отверстием, *в* — с двумя отверстиями, *г* — с четырьмя отверстиями, *д* — с восемью отверстиями [рисунок автора]

Figure 3. First principal stresses diagrams of samples with holes located parallel to the compressive load (top view): **(a)** without holes, **(b)** with one hole, **(c)** with two holes, **(d)** with four holes, **(e)** with eight holes

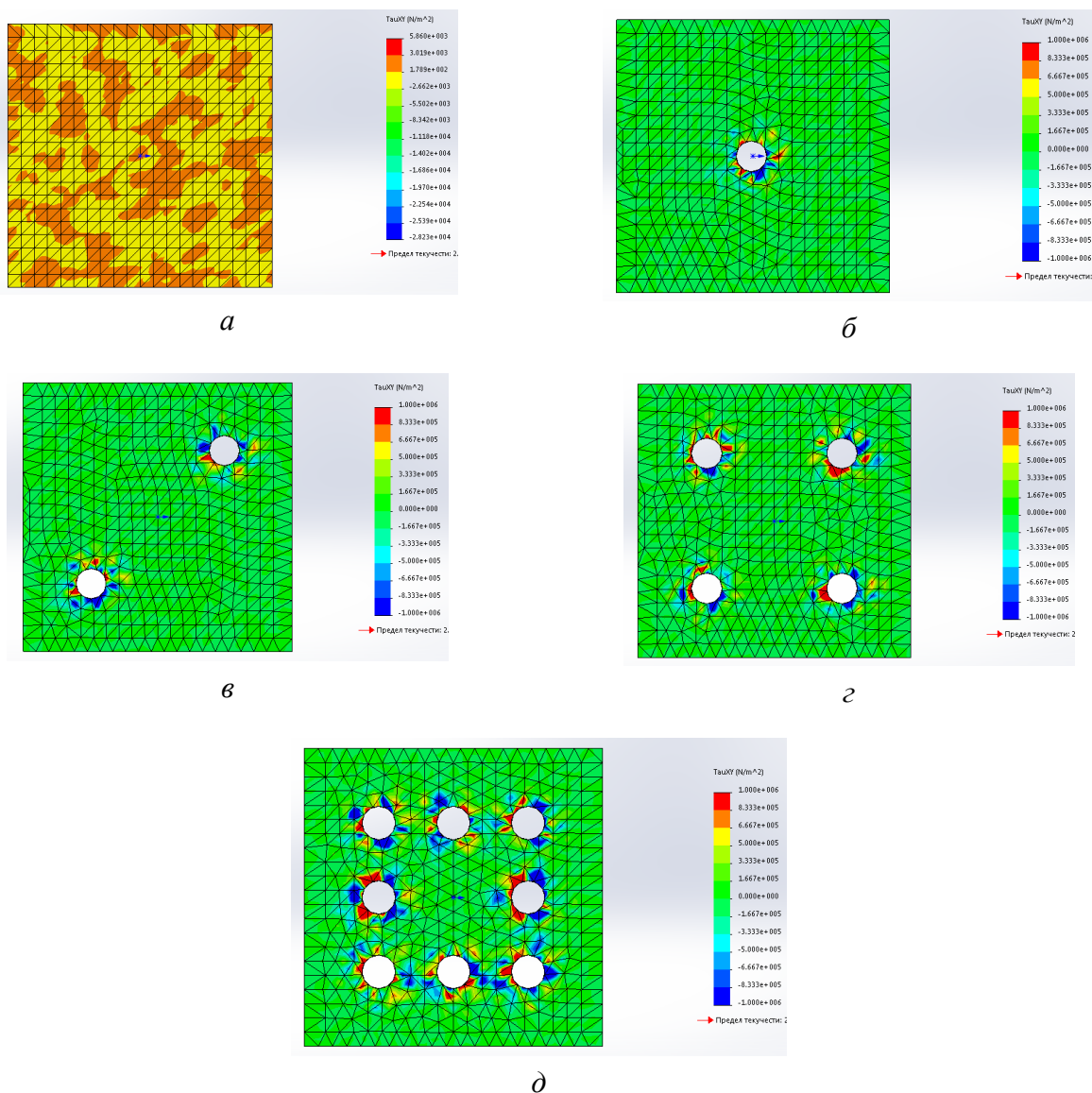


Рисунок 4. Эпюры касательных напряжений образцов с отверстиями, расположенными параллельно сжимающей нагрузке (вид сверху): *а* — без отверстий, *б* — с одним отверстием, *в* — с двумя отверстиями, *г* — с четырьмя отверстиями, *д* — с восемью отверстиями [рисунок автора]

Figure 4. Tangential stresses diagrams of samples with holes located parallel to the compressive load (top view): **(a)** without holes, **(b)** with one hole, **(c)** with two holes, **(d)** with four holes, **(e)** with eight holes

На рисунках 5 и 6 представлены эпюры распределения первых главных и касательных напряжений моделей образцов без отверстий и с отверстиями, расположенными перпендикулярно сжимающей нагрузке.

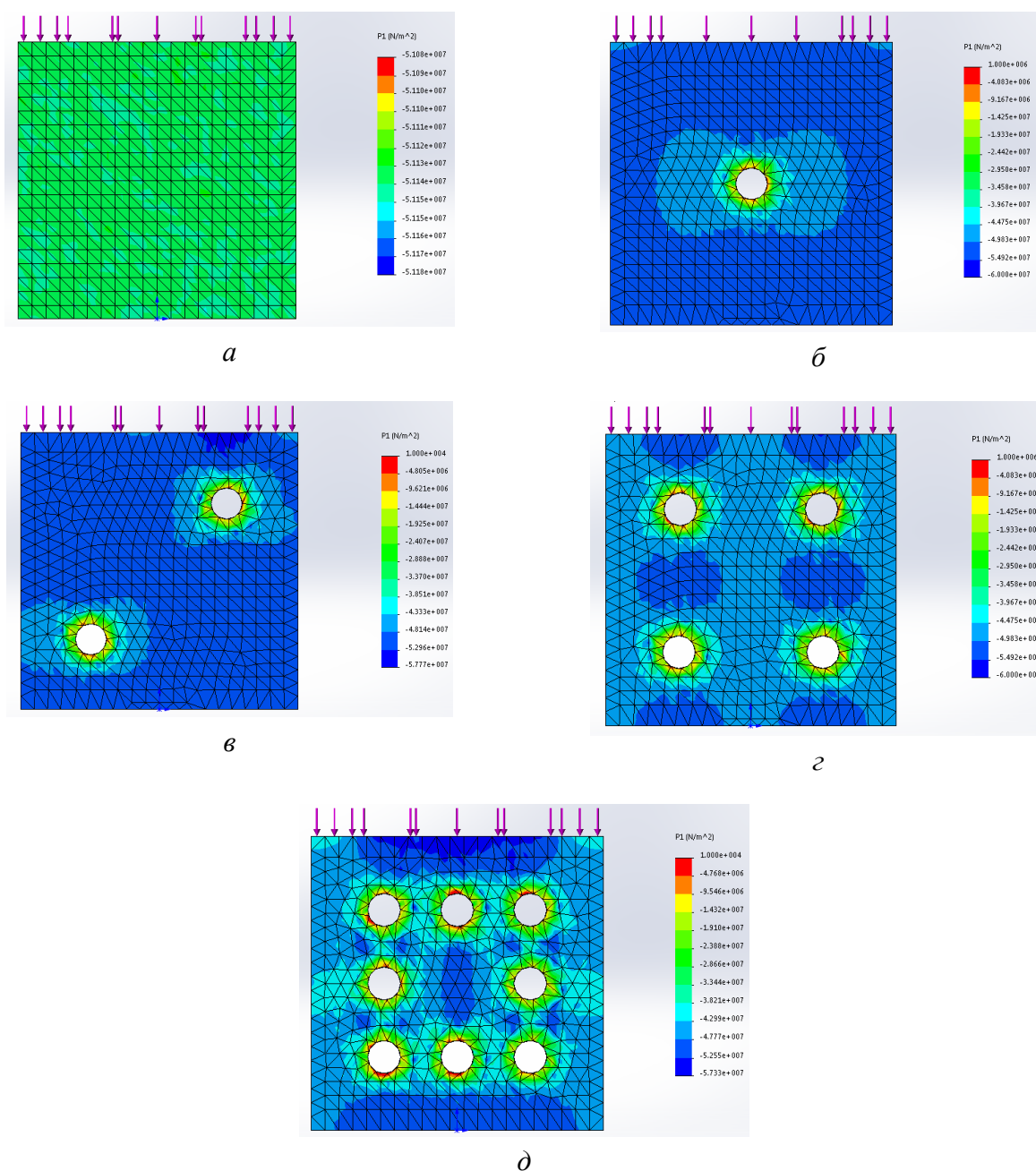


Рисунок 5. Эпюры первых главных напряжений образцов с отверстиями, расположенными перпендикулярно сжимающей нагрузке (вид спереди): *a* — без отверстий, *б* — с одним отверстием, *в* — с двумя отверстиями, *г* — с четырьмя отверстиями, *д* — с восемью отверстиями [рисунок автора]

Figure 5. First principal stresses diagrams of samples with holes located perpendicular to the compressive load (front view): **(a)** without holes, **(b)** with one hole, **(c)** with two holes, **(d)** with four holes, **(e)** with eight holes

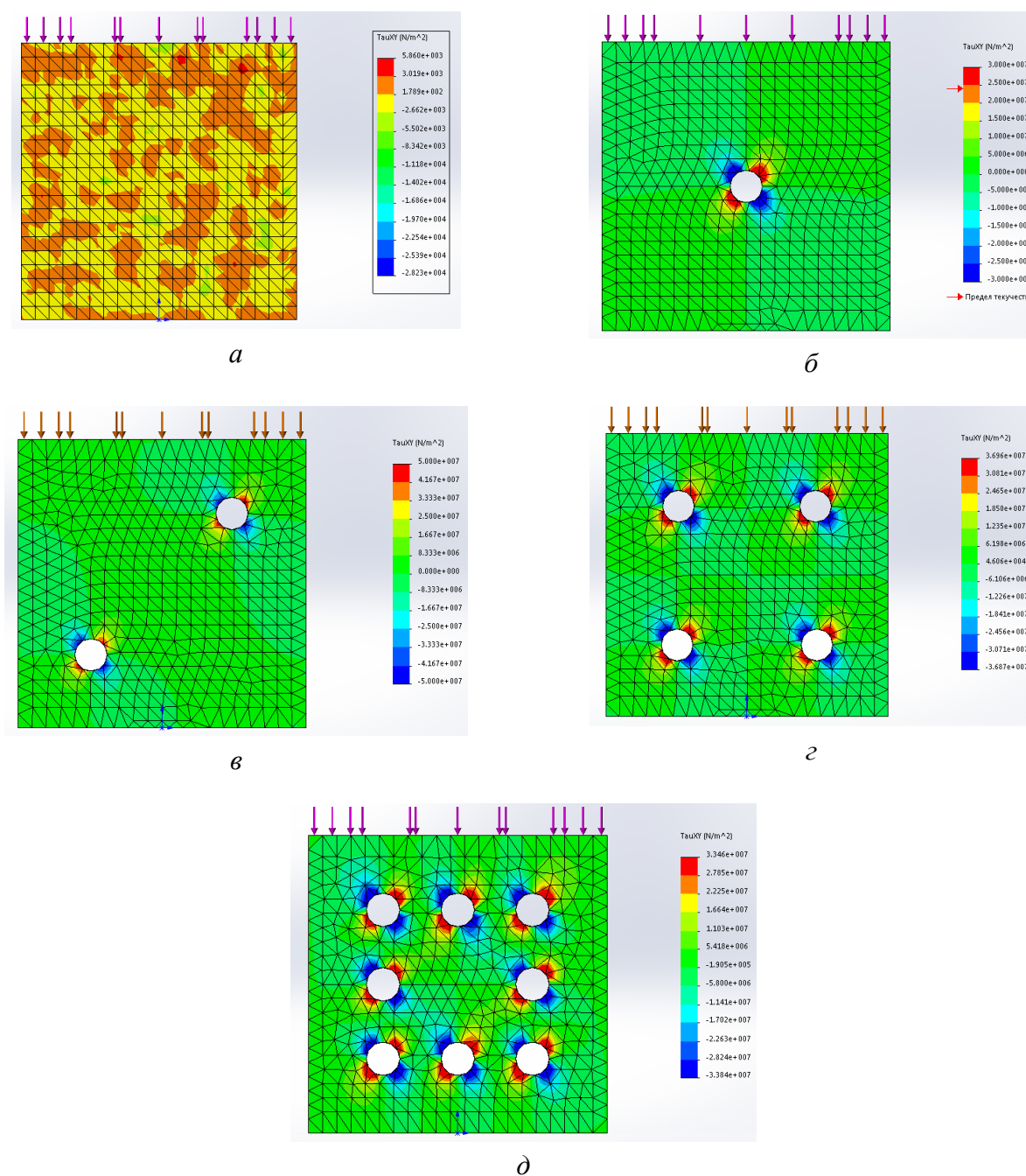


Рисунок 6. Эпюры касательных напряжений образцов с отверстиями, расположенными перпендикулярно сжимающей нагрузке (вид спереди): *a* — без отверстий, *б* — с одним отверстием, *в* — с двумя отверстиями, *г* — с четырьмя отверстиями, *д* — с восемью отверстиями [рисунок автора]

Figure 6. Tangential stresses diagrams of samples with holes located perpendicular to the compressive load (front view): **(a)** without holes, **(b)** with one hole, **(c)** with two holes, **(d)** with four holes, **(e)** with eight holes

4. Обсуждение и заключение

Данные, представленные в таблице, показывают, что с увеличением количества отверстий несущая способность образцов с отверстиями, расположенными параллельно сжимающей нагрузке, уменьшается незначительно, с 84,171 кН для образцов без отверстий до 82,762 кН для образцов с восемью отверстиями, что составляет 1,67 %. Несущая способность образцов с отверстиями, расположенными перпендикулярно сжимающей нагрузке, с увеличением количества отверстий уменьшается более значительно. Так, несущая способность образцов с восемью отверстиями уменьшилась относительно образцов без отверстий на 38,69 % — с 84,171 до 51,605 кН.

Как видно на фото 2 и 3, разрушение образцов без отверстий и образцов с отверстиями, расположенными параллельно сжимающей нагрузке, произошло вследствие сдвига частиц древесины под углами 30—45° к первой главной площадке образцов (т. е. к поперечному сечению образцов). Известно, что под углом 45° возникают наибольшие касательные напряжения. Следовательно, причиной разрушения образцов является превышение наибольших касательных напряжений над допускаемыми напряжениями, что соответствует теории наибольших касательных напряжений.

На фото 4 представлено разрушение образцов с отверстиями, расположенными перпендикулярно сжимающей нагрузке, это произошло вследствие возникновения в областях, сосредоточенных около отверстий, поперечных трещин, т. е. под углом 0° к первой главной площадке образцов. Известно, что под углом 0° возникают наибольшие нормальные напряжения. Такая картина разрушения характерна при превышении наибольших нормальных напряжений над допускаемыми напряжениями, что соответствует теории наибольших нормальных напряжений.

В связи с вышеизложенным можно предположить, что при появлении в образцах отверстий и изменении их количества и направления относительно направления сжимающей нагрузки в образцах происходит изменение характера распределения нормальных и касательных напряжений, причём отверстия, расположенные перпендикулярно сжимающей нагрузке, являются концентраторами напряжений, и в областях, сосредоточенных около отверстий, локализуются местные напряжения.

Как видно по рисункам 3а и 5а, в модели образцов без отверстий в материале возникают сжимающие напряжения, равномерно распределённые по всему объёму.

В моделях образцов с отверстиями, расположенными параллельно сжимающей нагрузке (рисунок 3), в материале возникают сжимающие напряжения, причём по мере приближения к отверстиям сжимающие напряжения уменьшаются. В точках материала, локализованных в областях около отверстий, сжимающие напряжения наименьшие.

В моделях образцов с отверстиями, расположенными перпендикулярно сжимающей нагрузке (рисунок 5), в большинстве точек материала возникают сжимающие напряжения, причём по мере приближения к отверстиям сжимающие напряжения уменьшаются, особенно

в направлении, перпендикулярном к сжимающей нагрузке. В точках материала, локализованных в областях над и под отверстиями, возникают наибольшие растягивающие напряжения. Эти растягивающие напряжения и приводят к отрыву частиц материала и возникновению поперечных трещин.

Как видно по рисункам 4а и 6а, в модели образцов без отверстий положительные и отрицательные касательные напряжения чередуются и распределяются по объёму материала равномерно.

В моделях образцов с отверстиями, расположенными параллельно сжимающей нагрузке (рисунок 4), положительные и отрицательные касательные напряжения чередуются. В точках, локализованных в областях около отверстий, наблюдаются наибольшие положительные и отрицательные касательные напряжения.

В моделях образцов с отверстиями, расположенными перпендикулярно сжимающей нагрузке (рисунок 6), в точках, локализованных в областях около отверстий, наблюдаются наибольшие положительные и отрицательные касательные напряжения, направленные перпендикулярно друг к другу, что соответствует закону парности касательных напряжений. По мере удаления от отверстий касательные напряжения уменьшаются, оставаясь перпендикулярными друг к другу.

Результаты эксперимента и моделирования показывают, что несущая способность образцов зависит от количества отверстий и угла их наклона к направлению сжимающей нагрузки. Причиной этого является то, что с изменением количества отверстий и угла их наклона, во-первых, изменяется площадь сечения образцов, и, во-вторых, изменяется характер распределения нормальных и касательных напряжений и теории прочности, а следовательно, и величина допускаемого напряжения, т. к. известно, что несущая способность прямо пропорциональна площади сечения и допускаемому напряжению:

$$F_{\max} = [\sigma] \cdot A, \quad (1)$$

где $F_{\max}$ — несущая способность образцов, $[\sigma]$ — допускаемое напряжение образцов.

На рисунке 7 показаны сечения образцов без отверстий и с отверстием, расположенным параллельно и перпендикулярно сжимающей нагрузке, а также под наклоном к ней.

Площадь сечения образцов можно вычислить следующим образом (см. рисунок 7):

а) без отверстий:

$$A = a^2, \quad (2)$$

б) с отверстиями, расположенными параллельно сжимающей нагрузке:

$$A_0 = a^2 - \frac{\pi}{4} \cdot d^2 \cdot n, \quad (3)$$

в) с отверстиями, расположенными перпендикулярно сжимающей нагрузке:

$$A_{90} = a^2 - a \cdot d \cdot n, \quad (4)$$

г) с отверстиями, расположенными под наклоном к сжимающей нагрузке:

$$A_{\alpha} = a^2 - \frac{\pi}{4} \cdot d \cdot b \cdot n, \quad (5)$$

где a — сторона образца, d — диаметр отверстия, n — количество отверстий, b — большая ось эллипса.

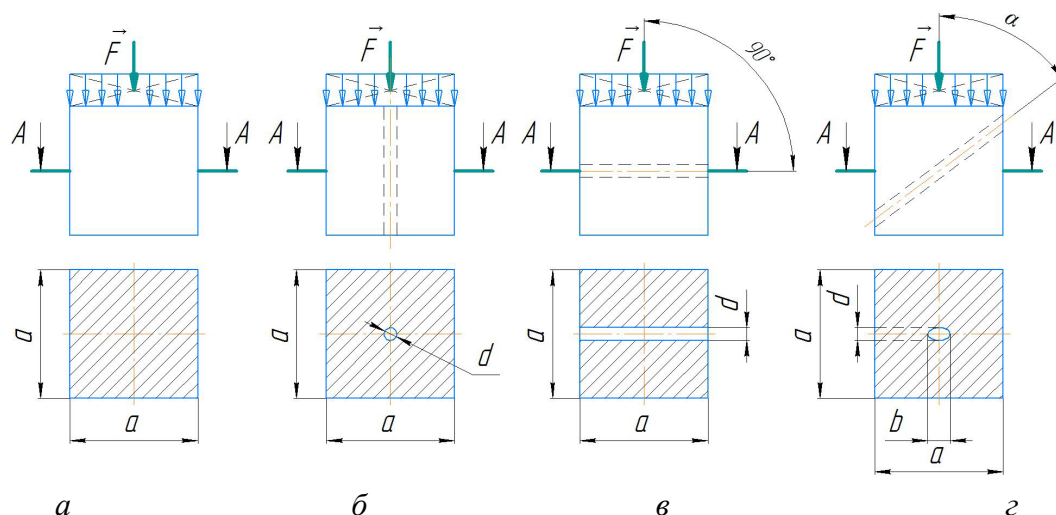


Рисунок 7. Сечения образцов: *a* — без отверстий, *б* — с отверстием, расположенным параллельно сжимающей нагрузке, *в* — с отверстием, расположенным перпендикулярно сжимающей нагрузке, *г* — с отверстием, расположенным под наклоном к сжимающей нагрузке [рисунок автора]

Figure 7. Cross-sections of samples: **(a)** without holes, **(b)** with a hole located parallel to the compressive load, **(c)** with a hole perpendicular to the compressive load, **(d)** with a hole inclined to the compressive load

Из выражений (2—5) видно, что с увеличением количества отверстий и угла их наклона площадь сечения образцов уменьшается в интервале

$$A_{90} \leq A_{\alpha} \leq A_0. \quad (6)$$

В соответствии с этим площадь сечения образцов с отверстиями, расположенными под углом к сжимающей нагрузке, можно вычислить следующим образом:

$$\begin{aligned} A_{\alpha} &= A_0 - (A_0 - A_{90}) \cdot \sin \alpha = \\ &= a^2 - \frac{\pi}{4} \cdot d^2 \cdot n - \left(a^2 - \frac{\pi}{4} \cdot d^2 \cdot n - a^2 + a \cdot d \cdot n \right) \cdot \sin \alpha = \\ &= a^2 - \frac{\pi}{4} \cdot d^2 \cdot n - \left(a - \frac{\pi}{4} \cdot d \right) \cdot d \cdot n \cdot \sin \alpha, \end{aligned} \quad (7)$$

где α — угол наклона отверстий к направлению сжимающей нагрузки.

Подставив выражение (7) в формулу (1), получим:

$$F_{\max} = [\sigma] \cdot A_{\alpha} = [\sigma] \cdot \left(a^2 - \frac{\pi}{4} \cdot d^2 \cdot n - \left(a - \frac{\pi}{4} \cdot d \right) \cdot d \cdot n \cdot \sin \alpha \right). \quad (8)$$

Выражение (8) представляет собой обобщённую модель изменения несущей способности образцов в зависимости от величины отверстий (переменная d), количества отверстий (переменная n), угла наклона отверстий (переменная α) и допускаемого напряжения, которое также является переменной величиной, т. к. появление в образцах отверстий приводит к изменению характера распределения нормальных и касательных напряжений и причин разрушения образцов.

На рисунке 8 представлены данные об изменении несущей способности образцов в зависимости от количества отверстий и угла их наклона, рассчитанные теоретически по модели (8) и полученные в ходе эксперимента.

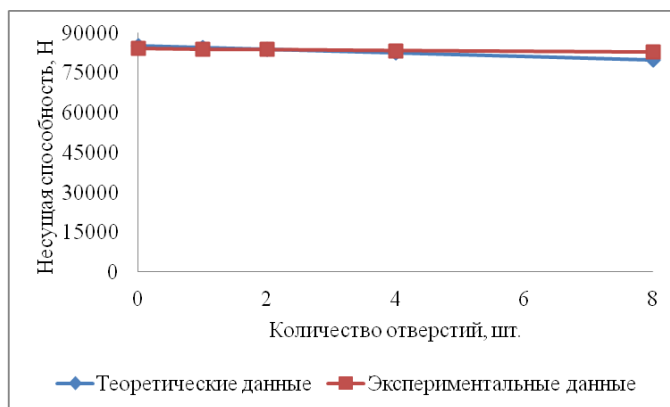
Как видно на рисунке 8, данные об изменении несущей способности образцов, полученные теоретически по модели (8) и экспериментально, согласуются, что говорит об адекватности предложенной модели.

В ходе проведённого исследования было выявлено, что биоповреждения элементов деревянных конструкций исторических зданий в виде пустот и неоднородностей снижают их несущую способность. Причём степень деградации несущей способности зависит от количества биоповреждений и их направления. С изменением количества биоповреждений и их направления несущая способность элементов деревянных конструкций исторических зданий изменяется в соответствии с обобщённой моделью (8).

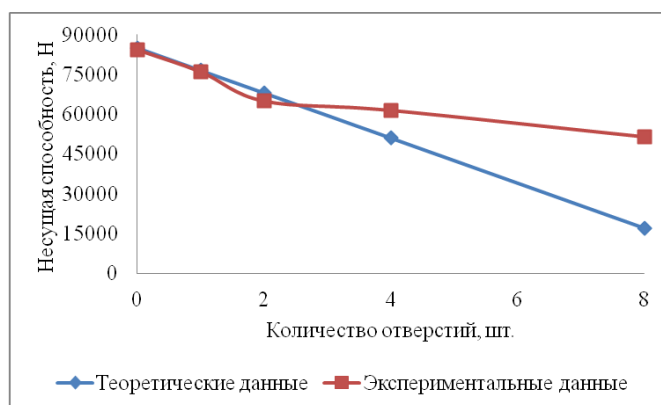
При исчерпании несущей способности элементов деревянных конструкций без биоповреждений и с биоповреждениями, расположенными параллельно сжимающей нагрузке, в них возникает сдвиг частей элементов деревянных конструкций под углами, близкими к 45° . Причиной возникновения сдвига являются касательные напряжения.

При исчерпании несущей способности элементов деревянных конструкций с биоповреждениями, расположенными перпендикулярно сжимающей нагрузке, в них возникают поперечные трещины. Причиной возникновения трещин являются растягивающие напряжения, которые концентрируются в областях около биоповреждений и являются местными напряжениями, превышающими допускаемые. Они приводят к отрыву частиц элементов деревянных конструкций исторических зданий друг от друга, в связи с чем биоповреждения играют роль концентраторов напряжений, что согласуется с существующими исследованиями [19—24].

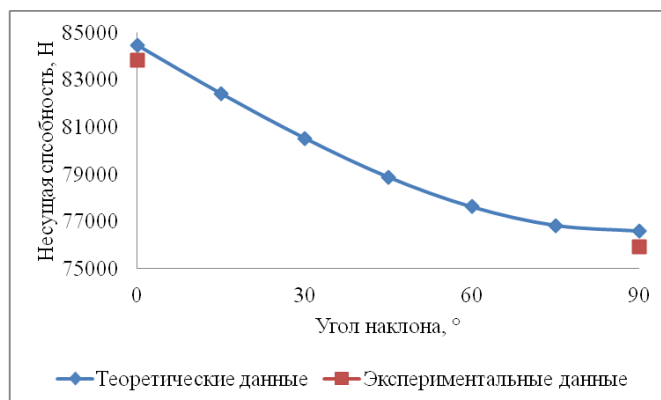
Наибольшую опасность для элементов деревянных конструкций исторических зданий, подверженных сжатию вдоль волокон древесины, представляют биоповреждения, направленные перпендикулярно волокнам древесины, поэтому выявление таких биоповреждений должно быть одной из основных целей мониторинга деревянных конструкций исторических зданий.



a



б



в

Рисунок 8. Теоретические и экспериментальные данные об изменении несущей способности образцов в зависимости от: *a* — количества отверстий при угле их наклона 0° , *б* — количества отверстий при угле их наклона 90° , *в* — угла наклона при одном отверстии [рисунок автора]

Figure 8. Theoretical and experimental data on change of samples load-bearing capacity depending on: **(a)** number of holes at their inclination angle of 0° , **(b)** number of holes at their inclination angle of 90° , **(c)** angle of inclination at 1 hole

Перспективами дальнейшего исследования является изучение закономерностей влияния биоповреждений на элементы деревянных конструкций исторических зданий, подверженных сжатию поперёк волокон древесины.

Представленная модель изменения несущей способности элементов деревянных конструкций исторических зданий, в зависимости от изменения количества биоповреждений и их направления, может быть использована при определении несущей способности деревянных конструкций исторических зданий в процессе их реставрации и сохранения.

Список литературы

1. Традиционное строительство из дерева и плотницкое мастерство / А. Б. Бодэ, О. А. Зинина, А. Ю. Косенков [и др.]. М.: Институт Наследия, 2019. 316 с.
2. Švajlenka J., Kozlovská M. Construction Systems Based on Wood // Efficient and Sustainable Wood-based Constructions. 2022. P. 17—34.
3. Martín J. A., López R. Biological Deterioration and Natural Durability of Wood in Europe // Forests. 2023. Vol. 14. P. 283.
4. Niekerk P. B., van, Brischke C., Niklewski J. Estimating the Service Life of Timber Structures Concerning Risk and Influence of Fungal Decay — A Review of Existing Theory and Modelling Approaches // Forests. 2021. Vol. 12, no. 5. P. 588.
5. Zabel R., Morrell J. Wood Microbiology: Decay and Its Prevention. Academic Press, 2020. 576 p.
6. Strength Loss Inference Due to Decay or Cavities in Tree Trunks Using Tomographic Imaging Data Applied to Equations Proposed in the Literature / M. N. dos Reis, R. Gonçalves, S. Brazolin [et al.] // Forests. 2022. Vol. 13, no. 4. P. 596.
7. Rust S., Detter A. Do Sonic Tomography and Static Load Tests Yield Comparable Values of Load-Bearing Capacity? // Forests. 2024. Vol. 15, no. 5. P. 768.
8. Mechanical Performance Degradation of Decaying Straight Mortise and Tenon Joints: Tusi Manor, Yunnan — Tibet Region / Y. Su, Z. Nong, H. Liu [et al.] // Forests. 2024. Vol. 15, no. 4. P. 667.
9. Curling S. F., Clausen C. A., Winandy J. E. Relationships Between Mechanical Properties, Weight Loss and Chemical Composition of Wood During Incipient Brown Rot Decay // Forest Products Journal. 2002. Vol. 52, no. 7. P. 34—37.
10. Arantes V., Goodell B. Current Understanding of Brown-Rot Fungal Biodegradation Mechanisms: A Review // Deterioration and Protection of Sustainable Biomaterials. 2014. Vol. 1158. P. 3—21.
11. Микозы древесины, его продукты и их использование. II. Биолого-морфологические процессы микологического разрушения древесины / Г. Н. Кононов, А. Н. Вережкин, Ю. В. Сердюкова [и др.] // Лесной вестник / Forestry Bulletin. 2020. № 24 (5). С. 89—96.
12. Study on the Characterization of Physical, Mechanical, and Mildew Resistance Properties of Enzymatically Treated Bamboo Fiber-Reinforced Polypropylene Composites / X. Meng, F. Hu, B. Liu [et al.] // Forests. 2024. Vol. 15, no. 1. P. 60.
13. Verbist M., Branco J. M., Nunes L. Characterization of the Mechanical Performance in Compression Perpendicular to the Grain of Insect-Deteriorated Timber // Buildings. 2020. Vol. 10, no. 1. P. 14.
14. Evaluation of the mechanical contribution of wood degraded by insects in old timber beams through analytical calculations and experimental tests / M. Degl'Innocenti, M. Nocetti, V. Kovačević [et al.] // Construction and Building Materials. 2022. Vol. 339. P. 127653.

15. Assessment of Wood Degradation Produced by Insects in Order to Quantify the Loss of Mechanical Strength of Load-Bearing Elements / M. Brunetti, G. Aminti, B. Pizzo [et al.] // Structural Analysis of Historical Constructions. 2024. Vol. 47.
16. How Bark Beetle Attack Changes the Tensile and Compressive Strength of Spruce Wood (*Picea abies* (L.) H. Karst.) / R. Löwe, M. Sedlecký, A. Sikora [et al.] // Forests. 2022. Vol. 13, no. 1. P. 87.
17. Chakkour T., Perre' P. Developing the orthotropic linear-elastic model for wood applications using the FE method // Materials Advances. 2024. Vol. 5. P. 7747—7765.
18. Validation of the Physical and Mechanical Properties of Eucalyptus benthamii Maiden & Cambage Wood and Cross Laminated Timber Panels Using the Finite Element Method / M. Z. Teixeira, R. F. Terezo, A. B. da Cunha [et al.] // Forests. 2024. Vol. 15, no. 5. P. 881.
19. Бараишков В. Н. Влияние круглого отверстия на напряжённое состояние равномерно растянутой пластины // Вестник ТГАСУ. 2017. № 5. С. 135—142.
20. Ratkova E., Gavrilov T., Kolesnikov G. Compression parallel to grain of pinewood specimens with simulated damage by holes: experiment and modeling // E3S Web of Conferences. 2023. Vol. 460. P. 09014.
21. Ермаков И. С., Сухомлинов Л. Г., Шиврин М. В. Численный анализ распределения напряжений вокруг круговых отверстий в тонких ортотропных упругих пластинах при одноосном растяжении // Космонавтика и ракетостроение. 2020. № 1 (112). С. 59—68.
22. Kolesnikov G., Gavrilov T. Sandstone Modeling under Axial Compression and Axisymmetric Lateral Pressure // Symmetry. 2022. Vol. 14. P. 796.
23. Katarov V., Syunev V., Kolesnikov G. Analytical Model for the Load-Bearing Capacity Analysis of Winter Forest Roads: Experiment and Estimation // Forests. 2022. Vol. 13. P. 1538.
24. Chawla K., Ray-Chaudhuri S. Stress and Strain Concentration Factors in Orthotropic Composites With Hole Under Uniaxial Tension // Curved and Layered Structures. 2018. Vol. 5. P. 213—231.

References

1. Bode A. B., Zinina O. A., Kosenkov A. Yu. *Traditional Wood Construction and Carpentry Skills*. Moscow, The Heritage Institute, 2019. 316 p. (In Russ.)
2. Švajlenka J., Kozlovská M. Construction Systems Based on Wood. *Efficient and Sustainable Wood-based Constructions*, 2022, pp. 17—34.
3. Martín J. A., López R. Biological Deterioration and Natural Durability of Wood in Europe. *Forests*, 2023, vol. 14, p. 283.
4. Van Niekerk P. B., Brischke C., Niklewski J. Estimating the Service Life of Timber Structures Concerning Risk and Influence of Fungal Decay — A Review of Existing Theory and Modeling Approaches. *Forests*, 2021, vol. 12, no. 5, p. 588.
5. Zabel R., Morrell J. *Wood Microbiology: Decay and Its Prevention*. Academic Press, 2020. 576 p.
6. Dos Reis M. N., Gonçalves R., Brazolin S., de Assis Palma S. S. Strength Loss Inference Due to Decay or Cavities in Tree Trunks Using Tomographic Imaging Data Applied to Equations Proposed in the Literature. *Forests*, 2022, vol. 13, no. 4, p. 596.
7. Rust S., Detter A. Do Sonic Tomography and Static Load Tests Yield Comparable Values of Load-Bearing Capacity? *Forests*, 2024, vol. 15, no. 5, p. 768.
8. Su Y., Nong Z., Liu H., Mao S., Jiang P., Qiang M., Wu Z. Mechanical Performance Degradation of Decaying Straight Mortise and Tenon Joints: Tusi Manor, Yunnan — Tibet Region. *Forests*, 2024, vol. 15, no. 4, p. 667.

9. Curling S. F., Clausen C. A., Winandy J. E. Relationships Between Mechanical Properties, Weight Loss and Chemical Composition of Wood During Incipient Brown Rot Decay. *Forest Products Journal*, 2002, vol. 52, no. 7, pp. 34—37.
10. Arantes V., Goodell B. Current Understanding of Brown-Rot Fungal Biodegradation Mechanisms: A Review. *Deterioration and Protection of Sustainable Biomaterials*, 2014, vol. 1158, pp. 3—21.
11. Kononov G. N., Verevkin A. N., Serdyukova Yu. V., Zaitsev V. D. Mycolysis of wood, its products and their use. II. Biological and morphological processes of mycological destruction of wood. *Forestry Bulletin*, 2020, vol. 24, no. 5, pp. 89—96. (In Russ.)
12. Meng X., Hu F., Liu B., Cao Y., Xu H., Li L., Yu L. Study on the Characterization of Physical, Mechanical, and Mildew Resistance Properties of Enzymatically Treated Bamboo Fiber-Reinforced Polypropylene Composites. *Forests*, 2024, vol. 15, no. 1, p. 60.
13. Verbist M., Branco J. M., Nunes L. Characterization of the Mechanical Performance in Compression Perpendicular to the Grain of Insect-Deteriorated Timber. *Buildings*, 2020, vol. 10, no. 1, p. 14.
14. Degl'Innocenti M., Nocetti M., Kovačević V., Aminti G., Betti M., Lauriola M. P., Brunetti M. Evaluation of the mechanical contribution of wood degraded by insects in old timber beams through analytical calculations and experimental tests. *Construction and Building Materials*, 2022, vol. 339, p. 127653.
15. Brunetti M., Aminti G., Pizzo B., Nocetti M. Assessment of Wood Degradation Produced by Insects in Order to Quantify the Loss of Mechanical Strength of Load-Bearing Elements. *Structural Analysis of Historical Constructions*, 2024, vol. 47.
16. Löwe R., Sedlecký M., Sikora A., Prokúpková A., Modlinger R., Novotný K., Turčáni M. How Bark Beetle Attack Changes the Tensile and Compressive Strength of Spruce Wood (*Picea abies* (L.) H. Karst.). *Forests*, 2022, vol. 13, no. 1, p. 87.
17. Chakkour T., Perre' P. Developing the orthotropic linear-elastic model for wood applications using the FE method. *Materials Advances*, 2024, vol. 5, pp. 7747—7765.
18. Teixeira M. Z., Terezo R. F., da Cunha A. B., Tomio G. F., Coelho H. B., Corrêa C. A. Validation of the Physical and Mechanical Properties of Eucalyptus benthamii Maiden & Cambage Wood and Cross Laminated Timber Panels Using the Finite Element Method. *Forests*, 2024, vol. 15, no. 5, p. 881.
19. Barashkov V. N. Effect of a Circular Hole on the Stress State of a Uniformly Stretched Plate. *Journal of Construction and Architecture*, 2017, no. 5, pp. 135—142. (In Russ.)
20. Ratkova E., Gavrilov T., Kolesnikov G. Compression parallel to grain of pinewood specimens with simulated damage by holes: experiment and modeling. *E3S Web of Conferences*, 2023, vol. 460, p. 09014.
21. Ermakov I. S., Sukhomlinov L. G., Shvirin M. B. Numerical Analysis of Stress Distribution Around Circular Holes in Thin Orthotropic Elastic Plates in Uniaxial Tension. *Cosmonautics and Rocket Engineering*, 2020, vol. 1, no. 112, pp. 59—68.
22. Kolesnikov G., Gavrilov T. Sandstone Modeling under Axial Compression and Axisymmetric Lateral Pressure. *Symmetry*, 2022, vol. 14, p. 796.
23. Katarov V., Syuney V., Kolesnikov G. Analytical Model for the Load-Bearing Capacity Analysis of Winter Forest Roads: Experiment and Estimation. *Forests*, 2022, vol. 13, p. 1538.
24. Chawla K., Ray-Chaudhuri S. Stress and Strain Concentration Factors in Orthotropic Composites With Hole Under Uniaxial Tension. *Curved and Layered Structures*, 2018, vol. 5, pp. 213—231.