

ГИПОТЕЗЫ ТЕОРИИ ВНУТРЕННИХ НАПРЯЖЕНИЙ В ДРЕВЕСИНЕ**HYPOTHESES OF THE THEORY OF INTERNAL STRESSES IN WOOD**

Хворых А.М., аспирант ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова», Воронеж, Россия

Димитров М.Е., студент ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова», Воронеж, Россия

Шамаев В.А., доктор технических наук, профессор ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова», Воронеж, Россия

Медведев И.Н., кандидат технических наук, доцент ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова», Воронеж, Россия

Руссу А.В., кандидат технических наук, ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова», Воронеж, Россия

Khvorykh A.M., postgraduate, Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, Voronezh, Russia

Dimitrov D.K., student, Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, Voronezh, Russia

Shamaev V.A., Doctor of Technical Sciences, professor Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, Voronezh, Russia

Medvedev I.N., Candidate of Technical Sciences, associate professor Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, Voronezh, Russia

Russu A.V., Candidate of Technical Sciences, Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, Voronezh, Russia

Аннотация: В статье рассмотрены основные гипотезы теории внутренних напряжений в древесине, которые описывают эти явления как в процессе физико-механической, химической обработки, так и в процессе эксплуатации. Методом попарного сравнения определены наиболее перспективные гипотезы для дальнейшей их разработки и формирования теории внутренних напряжений в древесине.

Abstract: The article examines the main hypotheses of the theory of internal stresses in wood, which describe these phenomena both in the process of physical-mechanical, chemical processing, and in the process of operation. The most promising hypotheses for their further development and formation of the theory of internal stresses in wood are determined by the method of pairwise comparison.

Ключевые слова: внутренние напряжения, древесина, усушка, анизотропия, механические свойства, влажность, температурные градиенты, сушка древесины, деформации.

Keywords: internal stresses, wood, shrinkage, anisotropy, mechanical properties, moisture, temperature gradients, wood drying, deformations.

Древесина - это ценный материал и возобновляемый природный ресурс. Для повышения эффективного и рационального ее использования в процессе обработки необходимо учитывать теоретические и прикладные аспекты древесиноведческой науки.

Положения теории внутренних напряжений в древесине, как важной части древесиноведческой науки, имеют как фундаментальное, так и прикладное значение. Внутренние напряжения в древесине возникают в процессе роста дерева, в ходе промышленной обработки древесины, особенно сушки, а также при ее эксплуатации. Внутренние напряжения являются причиной деформаций, растрескиваний, а также других дефектов, которые снижают качество материала и сокращают долговечность изделий из него. По этой причине особой ценностью обладают практические выводы теории, руководствуясь которыми можно улучшать качество изделий, повышать безопасность конструкций и оптимизировать технологические процессы.

Теория внутренних напряжений в древесине еще развивается и окончательно не оформлена. На данный момент в этом направлении проделана большая работа, судя по тому значительному количеству публикаций, которые описывают внутренние напряжения в древесине, исходя из различных аспектов. Из отечественных авторов в первую очередь заслуживает внимание работа Уголева Б.Н. [1]. В ней приводятся данные по теоретическому исследованию напряжений в древесине, обобщению методов определения напряжений, разработкам новых методов производственного контроля напряжений в материале. Из зарубежных стоит указать на работу, в которых исследуются режимы сушки с применением анализа процессов на нейронных сетях для выявления оптимальных режимов работы, оценки внутренних напряжений и возможных дефектов [2]; а также на работу, в которой предложена усовершенствованная модель оценки внутренних напряжений [3]

Создание объединенной теории внутренних напряжений в древесине, включающей все известные модели и теории, может быть чрезвычайно актуальным по нескольким причинам. Существующие модели часто описывают только отдельные аспекты поведения древесины, что ограничивает их применимость. В рамках единой теории можно было бы учесть все эти факторы. Объединенная теория могла бы быть применима к оценке свойств различных типов древесины, а также оценки учета физико-механических и химических факторов воздействия на нее, в том числе в различных условиях ее эксплуатации. Она также позволила бы описать наиболее оптимально изменения в материале в условиях масштабирования результатов от микроуровня (клетки, волокна) до макроуровня (конструкции, изделия).

Внутренние напряжения в древесине часто возникают из-за нелинейных процессов, таких как усушка, набухание, релаксация напряжений и взаимодействие с внешними нагрузками. Объединенная теория могла бы обеспечить единое описание нелинейных и хаотических систем, что делает ее перспективной для анализа таких явлений.

В условиях увеличения спроса на экологически чистые материалы древесина становится все более востребованной. Для проектирования сложных деревянных конструкций, например, в высотном строительстве или мостостроении, необходимо повышать точность и полноту применяемых расчетных моделей, которые максимально возможно учитывают все аспекты поведения древесины. Объединенная теория внутренних

напряжений могла бы обеспечить междисциплинарный подход, соединяющий знания из различных областей: материаловедения, механики, физики, математики и биологии. Это способствовало бы более глубокому пониманию природы древесины и разработке новых технологий её обработки и использования.

Кроме того, такая объединенная теория внутренних напряжений позволила бы: оптимизировать процессы сушки древесины, минимизируя деформации и трещины; повысить эффективность проектирование деревянных конструкций, повысив их долговечность и надежность; разработать на основе древесины новые композитные материалы с заданными свойствами; сократить отходы при обработке и увеличить эффективность использования ресурсов.

Научная гипотеза обладает большой ценностью, поскольку в общетеоретическом значении гипотезы являются основанием для теоретического описания и объяснения сложных физико-механических процессов, происходящих внутри материала. Они помогают упростить анализ и построить теоретическую и математическую модели явлений и процессов. В рамках гипотезы формулируют предположение, которое требует проверки, и тем самым она задаёт направление для научного исследования. То есть гипотеза помогает исследователям сконцентрироваться на более конкретном направлении или участке поиска, избегая хаотичности в своей работе. Поэтому в формировании и развитии теории внутренних напряжений в древесине гипотезы также имеют большое значение для обеспечения базы ее дальнейшего развития.

Рассмотрим последовательно основные гипотезы теории внутренних напряжений в древесине: о неравномерной усушке материала, о влиянии влажности, о релаксации напряжений, о влиянии анатомического строения, о температурном воздействии, о механико-сорбционном эффекте, о влиянии химического состава на материал, и о внешней нагрузке.

Одна из ключевых гипотеза теории внутренних напряжений в древесине – это гипотеза о неравномерной усушке материала (A_1): внутренние напряжения возникают из-за неравномерной усушки древесины в разных направлениях (радиальном, тангенциальном и продольном). Это связано с анизотропией древесины [4]. Гипотеза о влиянии влажности (A_2). Градиент влажности в древесине влияет на формирование внутренних напряжений. В зависимости от внешних условий наружные слои меняют свою влажность быстрее, чем внутренние [5]. Гипотеза о релаксации напряжений (A_3). Из-за явления ползучести в древесине внутренние напряжения со временем полностью или частично релаксируют (уменьшаются). Этот процесс усиливается с ростом температуры и влажности [6]. Гипотеза о влиянии анатомического строения (A_4). Направление волокон, плотность, наличие дефектов и пороков формируют структуру, которая влияет на внутренние напряжения [7]. Гипотеза о температурных воздействиях (A_5). Термодинамическая анизотропность, обусловленная вариативностью коэффициента теплового расширения, также является причиной внутренних напряжений [8]. Гипотеза о механико-сорбционном эффекте в древесине (A_6). Изменение влажности материала является не только причиной набухания или усадки, но и механико-сорбционной ползучести [9]. Гипотеза о влиянии химического состава (A_7). Химический состав древесины, в том числе после ее модификации химическими реагентами, влияет на ее

механические свойства и на внутренние напряжения в ней [10]. Кроме того, внешние нагрузки (A_8) также могут усиливать внутренние напряжения [11].

Для анализа гипотез внутренних напряжений в древесине используем метод попарного сравнения и исследований иерархий, разработанный Саати [12]. Это позволит в первом приближении определить приоритетные направления теории.

Суть метода анализа иерархий заключается в том, что исследователь, используя имеющуюся информацию, попарно сравнивает два фактора (табл. 1). Более значимый фактор получает больший вес, то есть более высокую экспертную оценку.

Таблица 1 – Попарное сравнение гипотез внутренних напряжений

X_{ij}	A_1	A_2	A_3	A_4	A_5	A_6	A_7	A_8	Вес
A_1	1	3	5	3	5	5	3	3	0,313
A_2	1/3	1	5	3	3	3	3	3	0,209
A_3	0,2	0,2	1	3	3	1/3	1	1/3	0,066
A_4	1/3	1/3	1/3	1	3	1/3	3	1/3	0,065
A_5	0,2	1/3	1/3	1/3	1	1/3	3	1/3	0,047
A_6	0,2	1/3	3	3	3	1	3	1/3	0,106
A_7	1/3	1/3	1	1/3	1/3	1/3	1	1/3	0,043
A_8	1/3	1/3	3	3	3	3	3	1	0,149

Вес находится по формуле

$$V_i = C_i / C, \quad (1)$$

где

$$C_i = \sqrt[n]{\prod_{j=1}^n X_{ij}}, \quad (2)$$

$$C = \sum_{i=1}^n C_i, \quad (3)$$

Процедура проверки экспертных оценок на непротиворечивость осуществляется следующим образом. Находим отношение согласованности $\frac{\chi}{\chi_{rand}}$ и сравниваем с табличным значением.

Величина случайной согласованности при $n=8$ составляет $\chi_{rand}=1,41$.

Индекс согласованности χ

$$\chi = \frac{\lambda - n}{n - 1} = 0,150, \quad (4)$$

где

$$\lambda = \sum_{j=1}^n R_j \cdot V_j = 9,05, \quad (5)$$

и суммы столбцов

$$R_j = \sum_{i=1}^n X_{ij} . \quad (6)$$

Получаем отношение согласованности $\frac{\chi}{\chi_{\text{rand}}} = 0,106 < 0,2$, следовательно уточнение матрицы парных сравнений не требуется.

На основании таблицы 1 можно заметить, что наиболее значимыми и приоритетными для исследования являются, по крайней мере, три гипотезы: о неравномерной усушке древесины, о влиянии влажности и о влиянии внешних нагрузок. Это позволяет сделать следующие выводы:

- вышеуказанные три гипотезы необходимо описать более детально;
- продолжить работу по оставшимся пяти гипотезам;
- провести поисковое исследование на предмет возможного увеличения числа гипотез, относящихся к процессам внутренних напряжений в древесине.

Список литературы

1. Уголев Б.Н. Контроль напряжений при сушке древесины / Б. Н. Уголев, Ю. Г. Лапшин, Е. В. Кротов. - Москва: Лесн. пром-сть, 1980 г. - 205 с.
2. Yin Q., Liu H-H. Drying Stress and Strain of Wood: A Review. *Applied Sciences*. 2021; 11(11):5023; doi: <https://doi.org/10.3390/app11115023>
3. Leelatanon S., Jantawee S., Vannarat S., and Matan, N. Evaluation of the drying stress in industrial kiln-dried boards using a force-based technique. *BioRes*. 2019. 14(2), 4403-4412; doi: 10.15376/biores.14.2.4403-4412
4. Kollmann F., Cote W. Principles of Wood Science and Technology. Solid Wood. Springer-Verlag, New York, Volume 1, 1968; doi: <https://doi.org/10.1007/978-3-642-87928-9>
5. Pang Sen. Modelling of stress development during drying and relief during steaming in pinus radiata lumber. *Drying Technology* 18 (2000): 1677 – 1696; doi: 10.1080/07373930008917806
6. Ranta-Maunus A. The viscoelasticity of wood at varying moisture content. *Wood Science and Technology* 1975, 9, 189–205; doi: <https://doi.org/10.1007/BF00364637>
7. Dinwoodie J.M. Timber: Its Nature and Behaviour. 2nd Edition, E & FN Spon, London. 2000; doi: <https://doi.org/10.4324/9780203477878>
8. Suleiman B., Larfeldt J., Leckner B. Thermal conductivity and diffusivity of wood. *Wood Science and Technology* 33, 465–473, 1999; doi: <https://doi.org/10.1007/s002260050130>
9. Hunt D. G. Creep trajectories for beech during moisture changes under load. *Journal of Materials Science*. 1984. Vol. 19. No. 5. pp. 1456-1467; doi: <https://doi.org/10.1007/bf00563040>
10. Roger M. Rowell. Handbook of Wood Chemistry and Wood Composites. 1st Edition. 2005. Boca Raton. P. 487; doi: <https://doi.org/10.1201/9780203492437>
11. Hassani M.M., Wittel F., Hering St., Herrmann H. Rheological Model for Wood. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*. 2014, 283; doi: <https://doi.org/10.1016/j.cma.2014.10.031>.

12. Saaty T.L. Relative measurement and its generalization in decision making why pairwise comparisons are central in mathematics for the measurement of intangible factors the analytic hierarchy/network process. *RACSAM - Revista de la Real Academia de Ciencias Exactas, Fisicas y Naturales. Serie A. Matematicas*, 2008, 102, 251-318; <https://doi.org/10.1007/BF03191825>

References

1. Ugolev B.N. Stress control during wood drying / B.N. Ugolev, Yu.G. Lapshin, E.V. Krotov. Moscow. Lesn. prom-st, 1980. 205 p.
2. Yin Q., Liu H-H. Drying Stress and Strain of Wood: A Review. *Applied Sciences*. 2021; 11(11):5023; doi: <https://doi.org/10.3390/app11115023>
3. Leelatanon S., Jantawee S., Vannarat S., and Matan, N. Evaluation of the drying stress in industrial kiln-dried boards using a force-based technique. *BioRes*. 2019. 14(2), 4403-4412; doi: 10.15376/biores.14.2.4403-4412
4. Kollmann F., Cote W. Principles of Wood Science and Technology. Solid Wood. Springer-Verlag, New York, Volume 1, 1968; doi: <https://doi.org/10.1007/978-3-642-87928-9>
5. Pang Sen. Modelling of stress development during drying and relief during steaming in pinus radiata lumber. *Drying Technology* 18 (2000): 1677 – 1696; doi: 10.1080/07373930008917806
6. Ranta-Maunus A. The viscoelasticity of wood at varying moisture content. *Wood Science and Technology* 1975, 9, 189–205; doi: <https://doi.org/10.1007/BF00364637>
7. Dinwoodie J.M. Timber: Its Nature and Behaviour. 2nd Edition, E & FN Spon, London. 2000; doi: <https://doi.org/10.4324/9780203477878>
8. Suleiman B., Larfeldt J., Leckner B. Thermal conductivity and diffusivity of wood. *Wood Science and Technology* 33, 465–473, 1999; doi: <https://doi.org/10.1007/s002260050130>
9. Hunt D. G. Creep trajectories for beech during moisture changes under load. *Journal of Materials Science*. 1984. Vol. 19. No. 5. pp. 1456-1467; doi: <https://doi.org/10.1007/bf00563040>
10. Roger M. Rowell. Handbook of Wood Chemistry and Wood Composites. 1st Edition. 2005. Boca Raton. P. 487; doi: <https://doi.org/10.1201/9780203492437>
11. Hassani M.M., Wittel F., Hering St., Herrmann H. Rheological Model for Wood. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*. 2014, 283; doi: <https://doi.org/10.1016/j.cma.2014.10.031>.
12. Saaty T.L. Relative measurement and its generalization in decision making why pairwise comparisons are central in mathematics for the measurement of intangible factors the analytic hierarchy/network process. *RACSAM - Revista de la Real Academia de Ciencias Exactas, Fisicas y Naturales. Serie A. Matematicas*, 2008, 102, 251-318; <https://doi.org/10.1007/BF03191825>