Вестник Евразийской науки / The Eurasian Scientific Journal https://esj.today

2024, Том 16, № 5 / 2024, Vol. 16, Iss. 5 https://esj.today/issue-5-2024.html

URL статьи: https://esj.today/PDF/35SAVN524.pdf

2.1.9. Строительная механика (технические науки)

**Ссылка для цитирования этой статьи:**
Пономарёв, В. С. Применение метода само-формообразования клееных деревянных конструкций для устройства купольного ребристого покрытия / В. С. Пономарёв // Вестник евразийской науки. — 2024. — Т. 16. — № 5. — URL: https://esj.today/PDF/35SAVN524.pdf

**For citation:**
Ponomarev V.S. Application of the method of self-shaping of glued wooden structures for the device of a dome ribber coating. *The Eurasian Scientific Journal*. 2024;16(5): 35SAVN524. Available at: https://esj.today/PDF/35SAVN524.pdf. (In Russ., abstract in Eng.)

**УДК 69.04**

**Пономарёв Владислав Семёнович**
ФГАОУ ВО «Пермский национальный исследовательский политехнический университет», Пермь, Россия
Аспирант
E-mail: vlad59russia@mail.ru
ORCID: https://orcid.org/0000-0003-0101-8344
РИНЦ: https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=1144370

# Применение метода само-формообразования клееных деревянных конструкций для устройства купольного ребристого покрытия

**Аннотация.** В статье автором представлена методика определения напряженно-деформированного состояния клееной деревянной конструкции, изготовленной методом само-формообразования, на примере устройства купольного ребристого покрытия.

Процесс само-формообразования клееных деревянных конструкций основан на гигроскопичных свойствах древесины. При производстве выделяют пассивные и активные слои. Активный слой предварительно замачивают, вследствие чего он увеличивается в размерах. После склеивания и последующей сушке древесины, вода из активного слоя испаряется, его геометрические размеры уменьшаются. Пассивные слой сопротивляется изменению геометрических размеров активного слоя, вследствие чего конструкция начинает изгибаться.

В основу методики расчета положена реологическая модель древесины, в которой полная относительная деформация древесины рассматривает как сумма пяти компонентов: упругой, пластической, деформации усушки (набухания) древесины, вязкоупругой и механико-сорбционной деформации.

Определение изменения влажности внутри древесины и на её поверхности в течение процесса сушки конструкции выполнено численным методом предварительно проведя аналогию между законами гидро- и термодинамики: процесс влагопереноса внутри древесины описан законами молекулярной диффузии А. Фика на основе законов теплопроводности Ж. Фурье, а испарение влаги с поверхности древесины — законом теплообмена Ньютона-Рихмана.

Методика определения напряженно-деформированное состояния клееных деревянных конструкций, изготовленных методом само-формообразования, состоит из двух этапов. На

первом этапе выполняется численное моделирование, при этом древесина рассматривается как ортотропный упругий материал. На втором этапе, аналитическом, выполняется уточнение напряженно-деформированного состояния с учетом пластических деформаций и деформаций ползучести.

На примере устройства купольного ребристого покрытия рассмотрен метод само-формообразования для создания клееной деревянной панели. Оценка напряженно-деформированного состояния конструкции показала, что напряжения, возникающие в древесине, меньше, чем расчетное сопротивление древесины на сжатие и растяжение.

**Ключевые слова:** процесс само-формообразования клееных деревянных конструкций; напряженно-деформированное состояние древесины

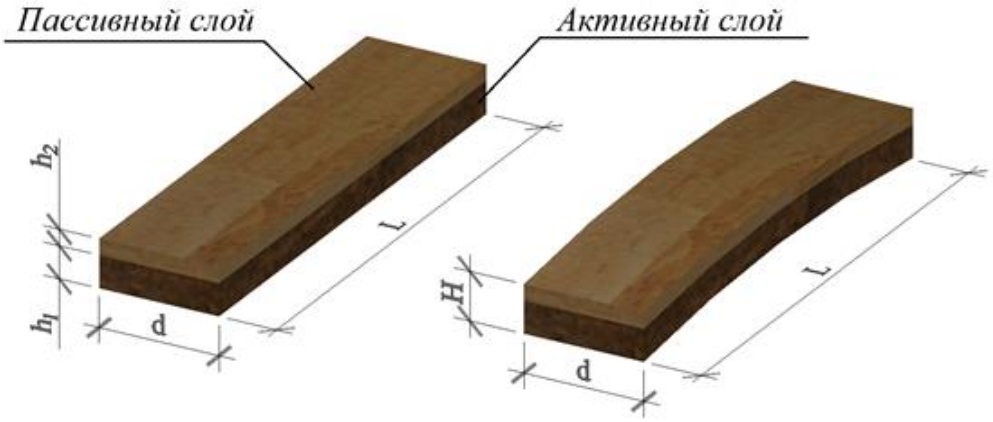
## Введение

Древесина — натуральный и экологичный материал. Исключительные механические свойства древесины позволяют использовать её в строительных конструкциях, подверженных химически-активным веществам. В то же время развивающаяся отрасль деревообработки сталкивается с проблемами из-за растущей геометрической сложности архитектурных проектов.

В поисках выразительных образов целесообразно использовать всё многообразие формообразующих свойств древесины, такие как изменение механических характеристик древесины под действием влаги и температуры, а также её анизотропию.

В 2014 году исследователи из Высшей школы г. Цюриха и немецкого университета г. Штутгарт, опираясь на исследования советского инженера Степана Тимошенко, предложили использовать «недостатки» древесины для создания деревянных конструкций уникальной формы. И свою разработку они назвали «метод само-формообразования клееных деревянных конструкций» [1].

Метод само-формообразования применяется для производства клеёных деревянных конструкций изогнутой формы. Основан данный метод на процессах усушки и разбухания древесины, а также на её анизотропии. Для придания изогнутой формы клеёной деревянной конструкции в ней выделяют активный и пассивный слои.




*L — длина; d — ширина; H — толщина; $h_1$ — толщина активного слоя; $h_2$ — толщина пассивного слоя*

***Рисунок 1.*** *Клеёная деревянная конструкция: слева — до сушки; справа — после сушки [2]*

Активный слой предварительно увлажняют, в отличие от пассивного. После склеивания слоев избыточная влага из активного слоя испаряется, вследствие чего в нем происходит

процесс усушки. Пассивный слой сопротивляется уменьшению геометрических размеров активного слоя, в результате чего клеёная деревянная конструкция начинает деформироваться и искривляться [2].

Величины деформации конструкции зависят от нескольких факторов: механические свойства пород древесины, взаимного расположения волокон активного и пассивного слоев, начальной и конечной влажности древесины и др.

## Материалы и методы

Для оценки прочности клеёной деревянной конструкции, изготовленной методом само-формообразования, применяется численный метод, в основу которого положена достоверная механическая модель поведения древесины.

В этом исследовании принята реологическая модель, предложенная коллективом из Щвейцарских и Немецкий исследователей, в которой полная относительная деформация древесины определяется как сумма пяти составляющих: упругой, пластической, деформации усушки (набухания) древесины, вязкоупругой и механико-сорбционной деформации (рис. 2) [3]:

$$\varepsilon = \varepsilon^{el} + \varepsilon^{pl} + \varepsilon^{\omega} + \sum_{i=1}^{n} \varepsilon_i^{ve} + \sum_{j=1}^{m} \varepsilon_j^{ms}, \quad (1)$$

где $\varepsilon^{el}$ — упругая деформация; $\varepsilon^{pl}$ — невосстанавливающаяся пластическая деформация; $\varepsilon^{\omega}$ — деформация усушки или набухания, вызванная изменением влажности древесины; $\varepsilon^{ve}$ — вязкоупругая деформация; $\varepsilon^{ms}$ — механико-сорбционная деформация.

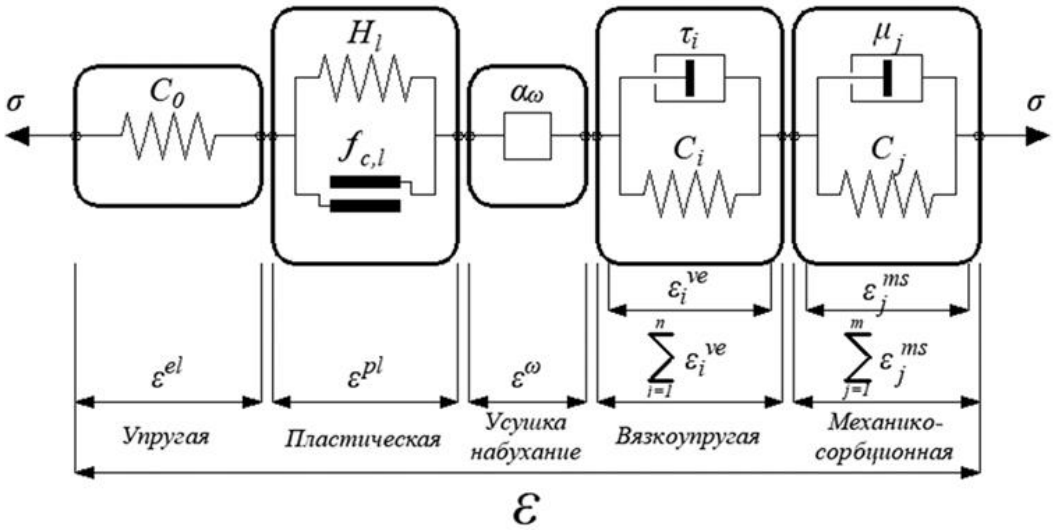



***Рисунок 2.*** *Схематическая иллюстрация реологической модели древесины [3]*

Упругая деформация представляет собой линейное и полностью восстанавливаемое поведение материала. Обобщенный закон Гука в матричной форме для данного тела записывается как [3; 4]:

$$\sigma = C_0 : \varepsilon^{el}, \quad (2)$$

где $C_0$ — тензор упругих констант.



35SAVN524
Издательство «Мир науки» \ Publishing company «World of science» http://izd-mn.com

Упругие константы породы древесины зависят от её влажности и определяются по результатам лабораторных исследований.

В пространстве переход от упругой к пластической деформации характеризуется тремя функциями в виде полиноминального критерия разрушения второго порядка [3]:

$$f_l\left(\sigma,\alpha_l,\omega\right)=a_l\left(\omega\right):\sigma+\sigma:b_l\left(\omega\right):\sigma+q_l\left(\alpha_l,\omega\right),\ l=R,T,L, \tag{3}$$

где $\alpha_l$ переменная деформированного состояния, которая связана с каждым анатомическим направлением древесины; $a_l$ и $b_l$ — аналоги тензоров прочности, которые описываются линейными функциями в зависимости от влажности древесины; $q_l$ — скалярное значение пластического упрочнения.

Для описания деформации усушки (набухания) древесины используется подход, аналогичный температурному расширению материала. Изменение линейных размеров древесины в различных анатомических направлениях прямо-пропорционально приращению содержания влаги в древесине [3]:

$$\varepsilon^{\omega}=\alpha_{\omega}\left(Min\left(\omega,\omega_{FS}\right)-\omega_0\right), \tag{4}$$

где $\omega$ — текущая влажность материала; $\omega_{FS}$ — влажность деревянного образца, при значении которой не происходит усадка или набухание (данная величина колеблется в пределах от 28 до 30 процентов [5]); $\omega_0$ — конечная влажность древесины.

При постоянном содержании влажности и при длительном нагружении в древесине возникает вязкоупругая деформация, зависящая от времени [6]. Исследователи описывают вязкоупругое поведение древесины на полностью восстанавливаемом подходе путем последовательного соединения элементов по модели Кельвина-Фойгта [3]. Изменение относительной вязкоупругой деформации ползучести во времени можно выразить как [7]:

$$\Delta\varepsilon_{i,n+1}^{ve}=C_i^{-1}\cdot\mathrm{T}_{i,n+1}\left(\frac{\Delta t}{\tau_i^{ve}}\right)\cdot\Delta\sigma_{n+1}-\left(\varepsilon_{i,n}^{ve}-C_i^{-1}\cdot\sigma_n\right)\cdot\left(1-exp\left(-\frac{\Delta t}{\tau_i^{ve}}\right)\right), \tag{5}$$

где вязкоупругая функция времени определяется как [7]:

$$\mathrm{T}_{i,n+1}\left(\frac{\Delta t}{\tau_i^{ve}}\right)=1-\frac{\tau_i^{ve}}{\Delta t}\cdot\left(1-exp\left(-\frac{\Delta t}{\tau_i^{ve}}\right)\right), \tag{6}$$

где $\Delta t=t_{n+1}-t$ — шаг времени, а $\tau_i$ — характеристическое время замедления.

Механико-сорбционная деформация — это эффект, при котором деформация нагруженного деревянного элемента при изменяющейся влажности древесины превышает суммы деформаций такого же деревянного элемента, при действии аналогичной нагрузки и при постоянном значении влажности, и ненагруженного элемента при изменяющейся влажности древесины. Описывается она аналогично вязкоупругой деформации, по модели Кельвина-Фойгта [3].

Приращение во времени значений механико-сорбционной деформация *j*-го элемента Кельвина-Фойгта определяется как [7]:

$$\Delta\varepsilon_{j,n+1}^{ms}=C_j^{-1}\cdot\mathrm{T}_{j,n+1}\left(\frac{\omega}{\mu_j}\right)\cdot\Delta\sigma_{n+1}-\left(\varepsilon_{j,n}^{ms}-C_j^{-1}\cdot\sigma_n\right)\cdot\left(1-exp\left(-\frac{|\omega|}{\mu_j}\right)\right), \tag{7}$$

где механико-сорбционная функция времени определяется как [7]:

$$\mathrm{T}_{j,n+1}\left(\frac{\Delta\omega}{\mu_j}\right)=1-\frac{\mu_j}{\Delta\omega}\cdot\left(1-exp\left(-\frac{|\Delta\omega|}{\mu_j}\right)\right), \quad (8)$$

где $\mu_j$ — характеристическая влажность; $|\Delta\omega|=|\omega_{n+1}-\omega_n|$ — значение абсолютного приращения влажности древесины.

Напряженно-деформированное состояние клеёной деревянной конструкции, изготовленной методом само-формообразования, зависит от распределения изополей влажности как внутри древесины, так и на её поверхности. Для их определения рассмотрены процессы влагопереноса внутри древесины и испарение влаги с поверхности клееной деревянной конструкции.

Влагоперенос внутри древесины зависит от коэффициентов диффузии, которые для ортотропного тела определяются по трем взаимно перпендикулярным направлениям [8]:

$$D=\left[D_R,D_T,D_L\right], \quad (9)$$

где $D_R,D_T,D_L$ — коэффициенты диффузии в радиальном, тангенциальном и продольном направлениях.

По результатам экспериментальных исследований было установлено, что коэффициенты диффузии древесины зависят от ей влажности и определяются как [9]:

$$D_l\left(\omega\right)=D_{0l}\left(e^{\alpha_{0l}\omega}\right), \quad (10)$$

где $D_{0l}$ и $\alpha_{0l}$ — параметры для расчета коэффициентов диффузии древесины, как экспоненциальной функции; $\omega$ — влажность древесины; $l=R,T,L$ — радиальное, тангенциальное и продольное направление волокон древесины, соответственно.

Испарение влаги с поверхности древесины определяется уравнениями [10]:

$$q_n=\rho_{\omega_{air}}\cdot S_u\cdot\left(\omega_{air}-\omega_{suf}\right), \quad (11)$$

$$S_u=3{,}2\cdot10^{-8}\cdot e^{4\omega}, \quad (12)$$

где $q_n$ — величина испарения влаги с поверхности древесины; $\rho_{\omega_{air}}$ — плотность древесины; $S_u$ — коэффициент поверхностной эмиссии; $\omega_{air}$ — равновесное содержание влаги в древесине; $\omega_{suf}$ — влажность древесины на её поверхности.

Для выполнения численного моделирования процесса естественной сушки древесины был использован модуль *Trainsient thermal* программного комплекса *Ansys Workbench*. Была проведена аналогия между законами гидро- и термодинамики: процесс влагопереноса внутри древесины описан законами молекулярной диффузии А. Фика на основе законов теплопроводности Ж. Фурье, а испарение влаги с поверхности древесины — закона теплообмена Ньютона-Рихмана.

$$\frac{\partial C}{\partial t}=D_R\frac{\partial^2 C}{\partial x^2}+D_T\frac{\partial^2 C}{\partial y^2}+D_L\frac{\partial^2 C}{\partial z^2}, \quad (13)$$

$$\rho_{\omega} \cdot V \cdot \frac{d\omega}{dt} = \rho_{\omega_{air}} \cdot S_u \cdot \left(\omega_{air} - \omega_{suf}\right) \cdot dF \ , \qquad (14)$$

где $\partial C/\partial t$ — градиент концентрации $C$ диффундирующего вещества в единицу времени $t$ через единицу площади; $\partial C/\partial x$ , $\partial C/\partial y$ и $\partial C/\partial z$ — градиент концентрации $C$ диффундирующего вещества по оси *X*, *Y* и *Z* соответственно, где $\rho_{\omega}$ — плотность древесины с влажностью $\omega$; $V$ — объем тела.

Методика определения напряженно-деформированного состояния клееной деревянной конструкции, изготовленной методом само-формообразования, состоит из двух этапов (рис. 3).

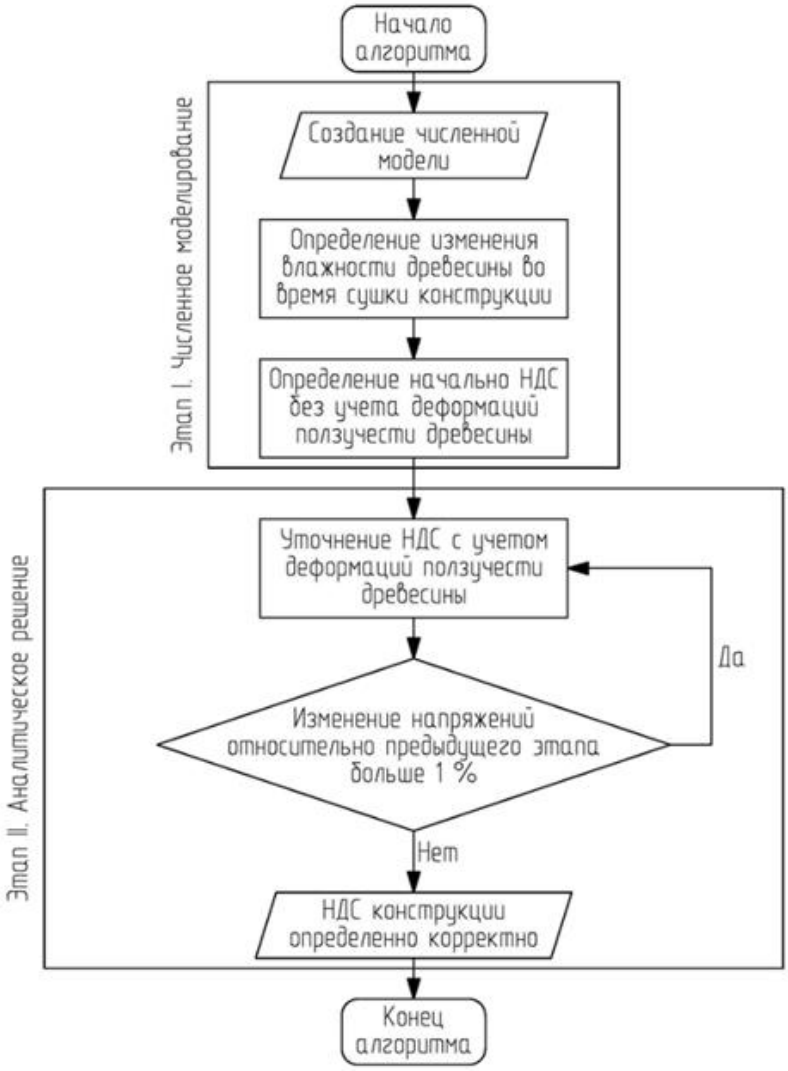



***Рисунок 3.*** *Общая схема (алгоритм) определения напряженно-деформированного состояния клеёной деревянной конструкции (составлено автором)*

На первом этапе выполняется численное моделирование из условия, что древесина рассматривается как ортотропный упругий материал. Для характерных точек клееной деревянной конструкции (рис. 4) определяются значения нормальных напряжений и деформаций в течение всего времени процесса само-формообразования.

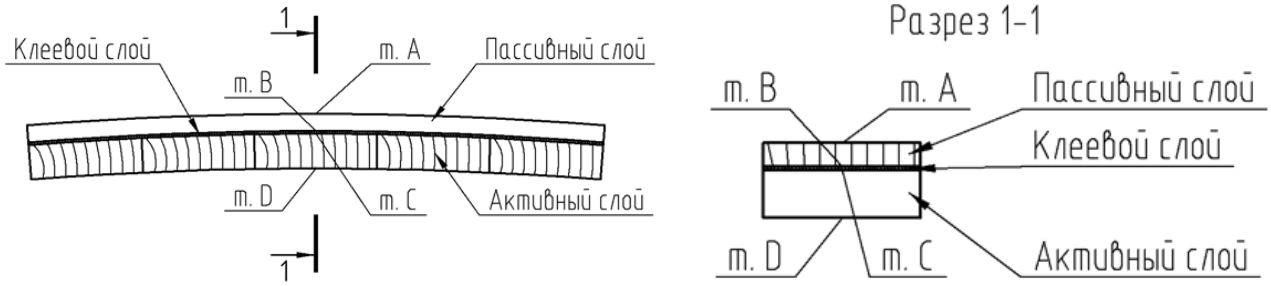
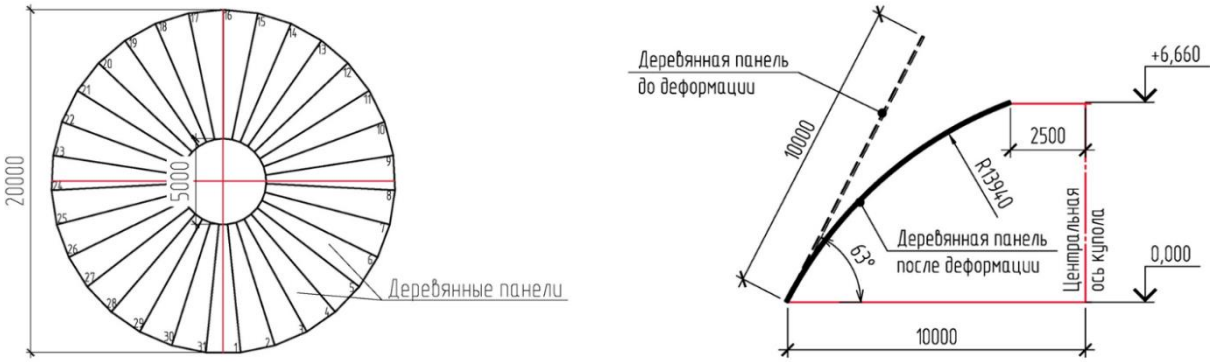



***Рисунок 4.*** *Расположение характерных точек клеёной деревянной конструкции (составлено автором)*

В данных точках в процессе изготовления клеёной деревянной конструкции методом само-формообразования возникают максимальные значения растягивающих и сжимающих напряжений, и, соответственно, максимальные значения относительных деформаций. На основании этих величин выполняется проверка прочности деревянной конструкции.

На втором этапе, аналитическом, уточняются значения максимальных напряжений и деформаций в характерных точках клееной деревянной конструкции с учетом деформаций ползучести.

В качестве примера в статье рассмотрено купольное ребристое покрытие, ребра которого изготовлены их клееных деревянных панелей методом само-формообразования (рис. 5).



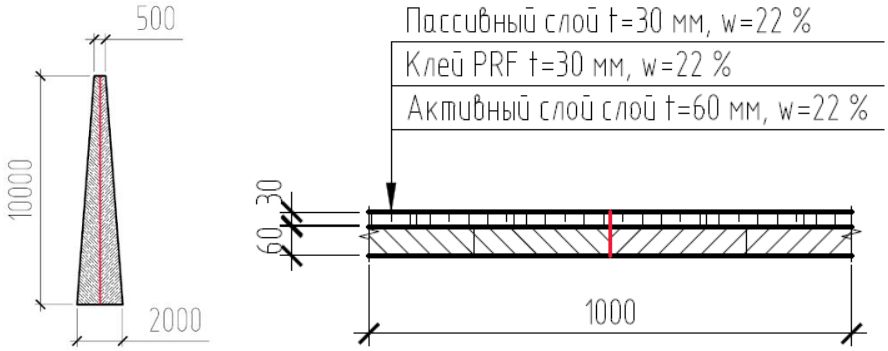

a b

c

***Рисунок 5.*** *Основные параметры купольного ребристого: a — план; b — вид в разрезе; c — трехмерная модель ребристого купольного покрытия (составлено автором)*


Издательство «Мир науки» \ Publishing company «World of science» http://izd-mn.com

Купольное покрытие имеет в основании и на вершине форму правильного многоугольника, вписанного в окружность радиусом 10 и 2,5 м, состоящего из 31 грани длиной 2 м. Деревянные панели имеют форму правильной трапеции высотой 10 м и основаниями 2,0 и 0,5 м (рис. 6).




*a* *b*

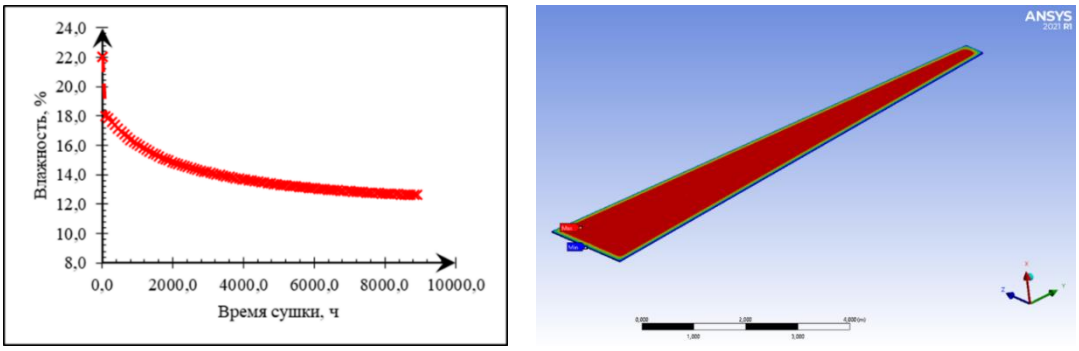
***Рисунок 6.*** *Геометрические размеры клееной деревянной панели: a — общий вид; b — поперечное сечение (составлено автором)*

Толщина пассивного слоя клееных деревянных конструкций составляет 30 мм, а активного — 60 мм. Отношение толщин пассивного и активного слоев 1 к 2. Толщина клеевого слоя — 0,5 мм. В плоскости, направление продольных волокон элементов пассивного и активного слоев образовывали угол 45°.

Сушка клееной деревянной конструкции моделировалась при начальной влажности элементов пассивного и активного слоя 22 %. Значение равновесной влажность древесины было принято 12 %. Общее время естественной сушки составило 9 000 ч при температуре 20°С и влажности воздуха 50 %.

## Результаты и обсуждение

По результатам выполненного исследования были получены зависимость изменения влажности древесины во времени и распределение влаги как внутри, так и на поверхности клееной деревянной конструкции в течение всего процесса сушки (рис. 7).



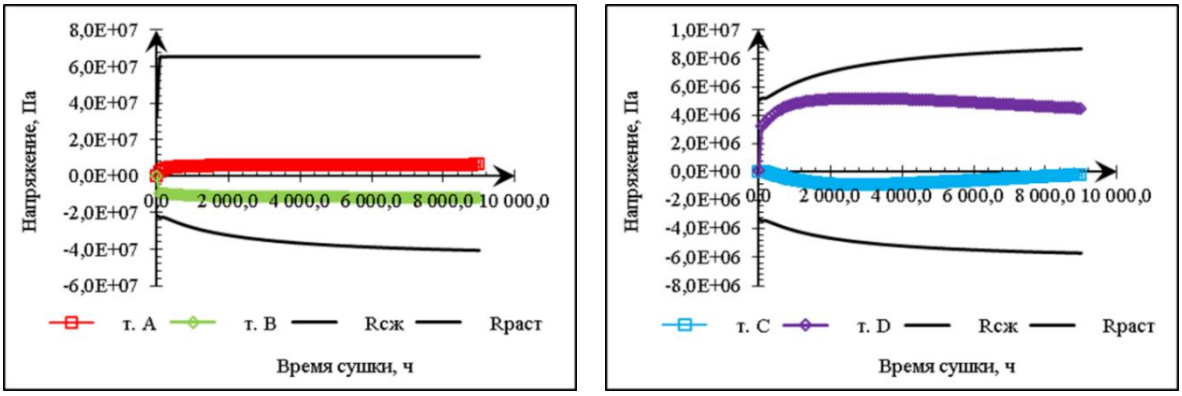

*a* *b*

***Рисунок 7.*** *Результаты численного моделирования процесса сушки клееной деревянной конструкции: a — график изменения влажности древесины во времени; b — распределение изополей влажности в элементах пассивного слоя после окончания процесса сушки (составлено автором)*

Зоны с наибольшей влажностью древесины расположены в центре клееной деревянной конструкции (отображены красным цветом), а менее влажные — по краям и на поверхности конструкции (отображены синим цветом).

По результатам численного моделирования максимальное горизонтальное перемещение верха клееной деревянной панели относительного нижнего ребра составило 3,59 м, а радиус кривизны конструкции — 13 940 мм.

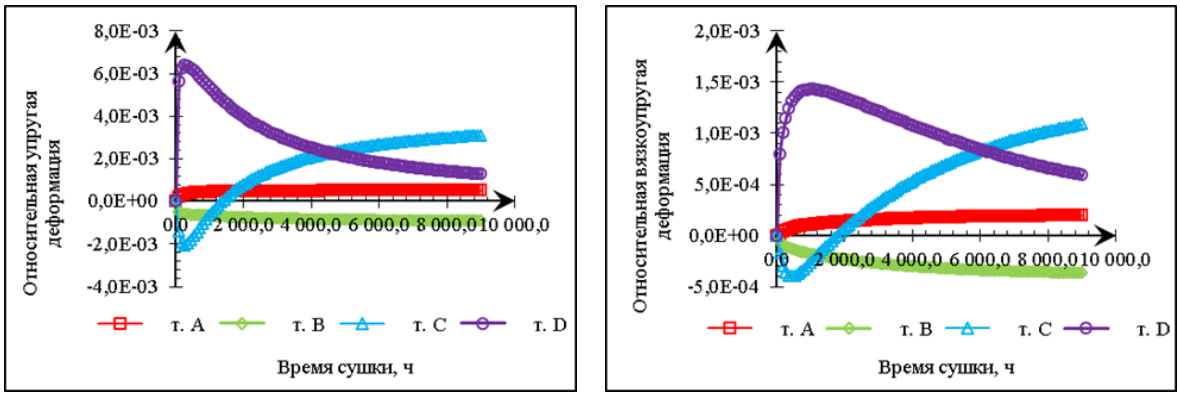
Графики изменение нормальных напряжений и относительных деформаций во времени, возникающих в элементах активного и пассивного слоев, представлены на рисунках 8 и 9 соответственно.



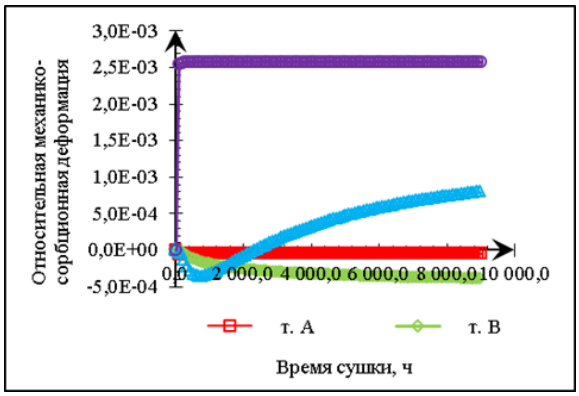

*a* *b*

***Рисунок 8.*** *Графики изменения нормального напряжения во времени: a — для элементов пассивного слоя; b — для элементов активного слоя (составлено автором)*

Абсолютные максимальные значения нормальных растягивающих и сжимающих напряжений, возникающих в клееной деревянной конструкции, характерны для элементов пассивного слоя.




*a* *b*




*c*

***Рисунок 9.*** *Графики изменения относительной деформации во времени: a — относительная упругая деформация; b — относительная вязкоупругая деформация; c — относительная механико-сорбционная деформация (составлено автором)*

Полученные зависимости изменения нормальных напряжений были сопоставлены со значениями предела прочности древесины в нормальном и радиальном направлениях. Анализ результатов позволил сделать вывод о том, что прочность клееной деревянной панели обеспечена. Кроме того, по окончанию процесса сушки клееной деревянной панели коэффициент запаса прочности достаточно велик. На основании этого можно говорить о том, что клееная деревянная панель дополнительно может воспринимать полезные и различные климатические нагрузки (снеговая, ветровая, ледовая).

Наибольшие величины относительной деформации возникают в элементах активного слоя, а наименьшие, в элементах пассивного слоя. В абсолютных значениях, наибольшие значения относительной деформации присущи упругой работе материала. Кроме того, по результатам численного моделирования было установлено, что пластические деформации в древесине не возникают.

Анализ результатов численного моделирования позволяет сделать вывод о том, что прочность клееной деревянной панели обеспечена, и, как следствие, метод само-формообразования позволяет создавать клееные деревянные конструкции сложной архитектурной формы.

## Заключение

На примере устройства купольного ребристого покрытия, рассмотрен процесс само-формообразования клееных деревянных панелей и проведена оценка напряженно-деформированного состояния всей конструкции. Анализируя результаты, полученные в рамках численно-аналитического моделирования, можно сделать вывод о том, что значения напряжений, возникающие в клееной деревянной конструкции в течение всего процесса само-формообразования, меньше значений пределов прочности древесины на сжатие и растяжение. Таким образом, метод само-формообразования может применяться для создания клееных деревянных конструкций криволинейной изогнутой формы.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Grönquist P. Analysis of hygroscopic self-shaping wood at large scale for curved mass timber structures / P. Grönquist, D. Wood, M.M. Hassani, F.K. Wittel, A. Menges, M. Rüggeberg // Science Advances. — 2019. — Vol. 5. № 9. — С. 1–7.
2. Пономарёв В.С., Кашеварова Г.Г. Современное состояние и перспективы развития реологических моделей процесса самоформообразования деревянных конструкций / Пономарёв В.С., Кашеварова Г.Г. // Вестник пермского национального исследовательского политехнического университета. Механика. — Пермь: Изд-во ПНИПУ, 2020. — С. 112–122.
3. Hassani M.M. Rheological model for wood / M.M. Hassani, F.K. Wittel, S. Hering, H. J. Herrmann // Comput. Methods Appl. Mech. Engrg. — 2014. — Vol. 283. — С. 1032–1060.
4. Resch E. Three-dimensional numerical analyses of load-bearing behavior and failure of multiple double-shear dowel-type connections in timber engineering / E. Resch, M. Kaliske // Computers and Structures. — 2010. — Vol. 88. — С. 165–177.
5. Пейч Н.Н. Сушка древесины / Н.Н. Пейч, Б.С. Царев. — Изд. 2-е, испр. и доп. — М.: Изд-во «Высшая школа», 1971. — 220 с.

6. Hering S. Moisture-dependent, viscoelastic creep of European beech wood in longitudinal direction / S. Hering, P. Niemz // Eur. J. Wood Prod. — 2012. — Vol. 70. — С. 667–670.

7. Fortino S. A three-dimensional moisture-stress fem analysis for timber structures / S. Fortino, T. Toratti // World Conference on Timber Engineering. — Trentino, 2010. — С. 1–8.

8. Kucharczyk A. Modelling and experimental study of moisture transport in wood, taking into account diffusion and the accompanying adsorption of water vapour by cell walls / A. Kucharczyk, K. Pawlik // Materials. — 2021. — Vol. 14. — С. 1–18.

9. Hering S. Characterisation and modelling of moisture-dependent plasticity for beech wood / S. Hering, S. Saft, E. Resch, P. Niemz, M. Kaliske // Holzforschung — International Journal of the Biology, Chemistry, Physics and Technology of Wood. — 2012. — Vol 66. — С. 373–380.

10. Fortino S. A 3D moisture-stress FEM analysis for time dependent problems in timber structures / S. Fortino, F. Mirianon, T. Toratti // Mech Time-Depend Mater. — 2009. — Vol. 13. — С. 333–356.

**Ponomarev Vladislav Semenovich**
Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russia
E-mail: vlad59russia@mail.ru
ORCID: https://orcid.org/0000-0003-0101-8344
RSCI: https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=1144370

# Application of the method of self-shaping of glued wooden structures for the device of a dome ribber coating

**Abstract.** In the article, the author presents a method for determining the stress-strain state of a glued wooden structure made by self-shaping, using the example of a device dome ribbed coating.

The process of self-shaping of glued wooden structures is based on the hygroscopic properties of wood. During production, passive and active layers are distinguished. The active layer is pre-moisturize, as a result of which it increases in size. After gluing and subsequent drying of the wood, the water from the active layer evaporates, its geometric dimensions decrease. The passive layer resists changing the geometric dimensions of the active layer, as a result of which the structure begins to bend.

The calculation method is based on a rheological model of wood, in which the total relative deformation of wood is considered as the sum of five components: elastic, plastic, shrinkage (swelling) deformation of wood, viscoelastic and mechanical sorption deformation.

The determination of moisture changes inside the wood and on its surface during the drying process of the structure was performed numerical method, having previously drawn an analogy between the laws of hydro- and thermodynamics: the process of moisture transfer inside the wood is described by the laws of molecular diffusion A. Fick considered on the laws of thermal conductivity J. Fourier, and the evaporation of moisture from the surface of wood is determined by the Newton-Richman law of heat transfer.

The method of determining the stress-strain state of glued wooden structures made by self-shaping consists of two stages. At the first stage, numerical modeling is performed, while wood is considered as an orthotropic elastic material. At the second stage, analytical, the stress-strain state is refined taking into account plastic deformations and creep deformations.

Using the example of a domed ribbed coating device, the self-shaping method for creating a glued wooden panel is considered. The assessment of the stress-strain state of the structure showed that the stresses arising in the wood are less than the calculated resistance of the wood to compression and tension.

**Keywords:** the process of self-shaping of glued wooden structures; the stress-strain state of wood