

Пономарёв В.С., Кашеварова Г.Г. Современное состояние и перспективы развития реологических моделей процесса самоформирования деревянных конструкций // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Механика. 2020. № 2. С. 112-122. DOI: 10.15593/perm.mech/2020.2.09

Ponomarev V.S., Kashevarova G.G. The current state and tendencies of using rheological models for self-forming wooden structures. *PNRPU Mechanics Bulletin*, 2020, no. 2, pp. 112-122. DOI: 10.15593/perm.mech/2020.2.09



ВЕСТНИК ПНИПУ. МЕХАНИКА

№ 2, 2020

PNRPU MECHANICS BULLETIN

<https://ered.pstu.ru/index.php/mechanics/index>



DOI: 10.15593/perm.mech/2020.2.09

УДК 539.388.8, (624.07)

## СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ И ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ РЕОЛОГИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ ПРОЦЕССА САМОФОРМИРОВАНИЯ ДЕРЕВЯННЫХ КОНСТРУКЦИЙ

В.С. Пономарев, Г.Г. Кашеварова

Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь, Россия

### О СТАТЬЕ

Получена: 06 марта 2020 г.

Принята: 20 мая 2020 г.

Опубликована: 30 июня 2020 г.

#### Ключевые слова:

процесс само-формирования деревянных конструкций, реологическая модель, деформация.

### АННОТАЦИЯ

Древесина – натуральный и экологичный материал. Исключительные механические свойства древесины позволяют использовать ее в строительных конструкциях, подверженных химическим активным веществам. Однако изменение механических характеристик древесины под воздействием воды и температуры, а также ее анизотропия ограничивают область применения этого материала. Зарубежные ученые, опираясь на результаты научных исследований С.П. Тимошенко, предложили метод, который позволяет использовать данные недостатки древесины для создания деревянных конструкций уникальной формы. Свой метод они назвали «самоформирование древесины».

В данной статье рассмотрены технологические аспекты процесса самоформирования клееных слоистых деревянных конструкций и различные реологические процессы, происходящие в слоях древесины, которые могут влиять на деформацию активного и пассивного слоев клееных деревянных конструкций.

Выполнен анализ современных реологических моделей древесины, предложенных или описанных отечественными и зарубежными учеными, а также рассмотрены результаты экспериментальных исследований и численного моделирования процесса самоформирования клееных слоистых деревянных конструкций зарубежных исследователей.

По результатам выполненного анализа установлено, что в современных реологических моделях не учитывается ряд факторов, которые влияют на процесс самоформирования клееных слоистых деревянных конструкций. Реологическая модель, включающая в себя наиболее полный перечень факторов, влияющих на деформацию древесины (упругую и пластическую деформации, усушку или разбухание древесины, деформацию вязкоупругой ползучести и механо-сорбционную деформацию), является наиболее перспективной для создания уникальных архитектурных объектов из клееной древесины. Но, к сожалению, в ней присутствует ряд недостатков, связанных в основном с учетом некоторых факторов и отсутствием экспериментальных исследований. К таким факторам относятся: геометрические параметры слоев клееных деревянных конструкций, характер обработки поверхности слоев, температура, а также порода древесины. Эти факторы влияют на процесс усушки и разбухания древесины и, соответственно, на конечную форму деревянной конструкции.

Требуются дополнительные экспериментальные и теоретические исследования механического поведения клееных деревянных конструкций, учитывающие указанные факторы, также необходимо рассмотреть и другие породы древесины, в том числе их комбинации.

© ПНИПУ

© Пономарёв Владислав Семенович – асп., e-mail: [vlad59russia@gmail.com](mailto:vlad59russia@gmail.com), ID: [0000-0003-0101-8344](https://orcid.org/0000-0003-0101-8344).

Кашеварова Галина Геннадьевна – д.т.н., проф., зав. каф., e-mail: [gkash@mail.ru](mailto:gkash@mail.ru), ID: [0000-0001-6456-8672](https://orcid.org/0000-0001-6456-8672).

Vladislav S. Ponomarev – PhD Student, e-mail: [vlad59russia@gmail.com](mailto:vlad59russia@gmail.com), ID: [0000-0003-0101-8344](https://orcid.org/0000-0003-0101-8344).

Galina G. Kashevarova – Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Department, e-mail: [gkash@mail.ru](mailto:gkash@mail.ru),

ID: [0000-0001-6456-8672](https://orcid.org/0000-0001-6456-8672).



Эта статья доступна в соответствии с условиями лицензии Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License (CC BY-NC 4.0)

This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License (CC BY-NC 4.0)

## THE CURRENT STATE AND TENDENCIES OF USING RHEOLOGICAL MODELS FOR SELF-FORMING WOODEN STRUCTURES

V.S. Ponomarev, G.G. Kashevarova

Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russian Federation

### ARTICLE INFO

Received: 06 March 2020

Accepted: 20 May 2020

Published: 30 June 2020

#### Keywords:

self-forming of wooden construction, a rheological model of wood, deformation.

### ABSTRACT

Wood is a natural and ecological material. Exceptional mechanical properties of wood allow it to be used in building structures subject to chemically active substances. However some changes in mechanical characteristics of wood under the influence of water and temperature, as well as its anisotropy, limit the application areas of this material. Based on the results of the research by S.P. Timoshenko, foreign scientists proposed a method that makes it possible to use these shortcomings of wood to create wooden structures of unique shapes.

This article considers the self-forming process of glued layered wooden structures, which is based on various rheological processes taking place in wood. In order to predict the shape of a glued layered wooden structure obtained with the self-forming method, an accurate rheological model is required, which takes into account all wood deformation mechanisms.

We analyzed the available rheological models of wood proposed or described both by Russian and foreign scientists, as well as the international experimental studies and numerical modeling results of the self-formed glued layered wooden structures.

Based on the analysis results, it was found that the present rheological models do not take into account a number of factors that influence the process of self-forming of glued layered wooden structures. The rheological model, which includes a complete list of factors affecting wood deformation (elastic and plastic deformation, wood shrinkage or swelling, viscous-elastic creep deformation and mechanical and sorption deformation), is the most promising for creating unique architectural objects from glued wood. But it also has a number of shortcomings, mainly due to inconsideration of some factors and few experimental studies. Such factors include the geometric parameters of layers of the glued wooden structures, the surface treatment of layers, temperature, as well as wood species. These factors influence the process of wood shrinkage and swelling, thus the final shape of a wooden structure.

It is necessary to have additional experimental and theoretical studies of the mechanical behavior of glued wooden structures which will take into account these factors, as well as to study other species of wood including their combinations.

© PNRPU

### Введение

С конца 30-х гг. прошлого века началось постепенное сокращение применения лесоматериалов в строительстве. Данная тенденция в первую очередь была вызвана развитием промышленного производства, строительством огромных предприятий, комплексов, где в качестве основных несущих строительных конструкций использовались изделия из металла и железобетона. Однако в середине 70-х гг. увеличение количества объектов с агрессивной средой вызвало рост применения деревянных и клеено-деревянных конструкций (КДК). Кроме того, при создании большинства конструктивных материалов требуются большие затраты энергии, дефицит которой ощущается уже сейчас во многих странах. В процессе создания древесины используется энергия Солнца, запасы которой колоссальны.

С увеличением использования древесины в строительстве развивались и методы расчета конструкций из данного материала. Многообразие изделий из древесины, различных по характеру назначения, определяют разнообразные методы их расчетов. К настоящему времени накоплен богатый опыт проектирования, произ-

водства, монтажа и эксплуатации деревянных конструкций, однако некоторые вопросы остаются не решенными до сих пор [1–4].

Древесина – природный анизотропный материал. Данное свойство связано со строением древесины, которое подразделяют на макро-, микро- и субмикроскопическое [5]. На макроскопическом уровне (рис. 1) на основных разрезах (поперечный, радиальный и тангенциальный) выделяют ряд специфических элементов и зон: заболонную и ядровую древесину, годовичные слои, сердцевидные лучи, сосуды, смоляные ходы и сердцевидную трубку.

На микроскопическом уровне основным структурным элементом является растительная клетка. Процесс созревания клетки заканчивается ее одревеснением. На протяжении этого времени стенки клетки утолщаются, приобретают жесткость и становятся более прочными, а после отмирают. Таким образом, большая часть древесных клеток даже в растущем дереве – мертвые, внутренние полости их заполнены либо воздухом, либо частично или полностью водой [5]. На субмикроскопическом уровне рассматриваются состав и строение растительной клетки.

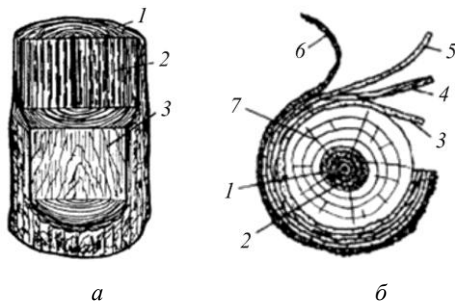


Рис. 1. Строение древесины на макроскопическом уровне: *a* – основные разрезы древесины (1 – поперечный, 2 – радиальный, 3 – тангенциальный); *б* – специфические элементы и зоны древесины (1 – сердцевидная трубка, 2 – ядро, 3 – годичные кольца, 4 – комбиальное кольцо, 5 – луб, 6 – кора, 7 – сердцевидные лучи) [1]

Fig. 1. The macroscopic structure of wood: (a) – main sections of wood (1 – cross, 2 – radial, 3 – tangential), (b) – specific elements and areas of wood (1 – center, 2 – core, 3 – growth ring, 4 – cambial ring, 5 – bast, 6 – bark, 7 – medullary ray) [1]

Характерной особенностью структуры древесины является специфическая ориентация в ней различных тканей. Их упорядоченное расположение образует волокнистую структуру. Кроме того, ей присуща и слоистая структура, так как древесина состоит из концентрически расположенных годичных слоев, на границах которых более или менее ярко выражено изменение некоторых механических свойств древесины.

Благодаря своей природной структуре древесина обладает рядом существенных преимуществ, таких как относительно малая плотность, высокая удельная прочность при растяжении вдоль волокон, стойкость к солевой агрессии и другим химически-активным веществам, высокие эстетические и акустические свойства, малый коэффициент теплопроводности поперек волокон и т.д. Но в то же время этот строительный материал имеет ряд недостатков: пороки древесины (сучки, косослои, закомелистость), которые существенно снижают качество изделий и конструкций; подверженность гниванию и поражение жуками; анизотропия и изменение физико-механических характеристик под влиянием различных факторов (вода, температура) [1]. Последние два недостатка существенно снижали область применения деревянных конструкций, но в начале второго десятилетия XXI в. ряд зарубежных ученых предложили способ, как обратить данные недостатки древесины в преимущества, и создали технологию самоформообразования деревянных конструкций [6], идею которой подсказали научные исследования С.П. Тимошенко [7].

### 1. Метод самоформообразования деревянных конструкций

Метод самоформообразования клееных деревянных конструкций основан на процессах усушки и разбухания древесины. Для придания изогнутой формы в КДК выделяют активный и пассивный слои (рис. 2). Активный слой предварительно увлажняют, вследствие чего

он разбухает, и его геометрические размеры увеличиваются. Пассивный слой является основой КДК. В процессе самоформообразования он сопротивляется усушке древесины активного слоя.

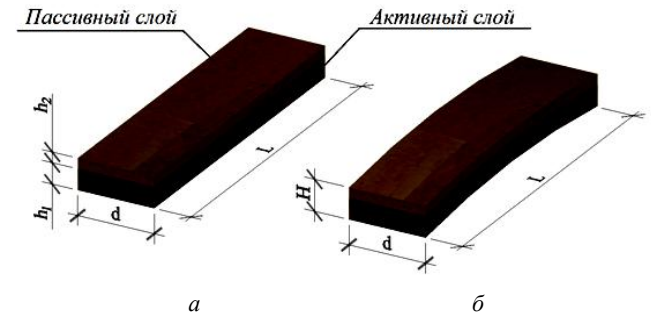


Рис. 2. Элементы деревянных конструкций: *a* – деревянный элемент до сушки; *б* – деревянный элемент после сушки: *L* – длина, *d* – ширина, *H* – толщина, *h*<sub>1</sub> – толщина активного слоя, *h*<sub>2</sub> – толщина пассивного слоя

Fig. 2. (a) the wooden element before drying, (b) the wooden element after drying: *L* is length, *d* is width, *H* is thickness, *h*<sub>1</sub> is the thickness of an active layer, *h*<sub>2</sub> is the thickness of the passive layer

### 2. Описание реологической модели

В настоящее время в инженерных расчетах принято считать древесину упругопластическим телом. Ряд отечественных и зарубежных ученых проводят исследования по уточнению или созданию новой реологической модели древесины.

Так, Е.М. Тюленева [8] предложила реологическую модель древесины, в которой полная относительная деформация древесины определяется как

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{E_1} + \frac{\sigma}{E_2} + \frac{\sigma}{E_3} \left( 1 - e^{-\frac{E_2 t}{\eta_2}} \right), \quad (1)$$

где  $\sigma$  – напряжение в деревянном элементе;  $E_1$  – мгновенный модуль упругости;  $E_2$  – модуль упругости второго рода;  $E_3$  – коэффициент прямопропорциональности (пластический модуль деформации);  $\eta_2$  – коэффициент эластичности;  $t$  – время нагружения деревянного образца.

Группа исследователей в составе Р.В. Юдина и А.С. Васеленко описали реологическое поведение древесины при изготовлении шпал. Авторы статьи [9] предлагают определять полную относительную деформацию древесины как

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{E_M} + \frac{\sigma}{E_M} \left( \frac{E_M}{E_g} - 1 \right) \left( 1 - e^{-\left( \frac{E_g}{E_M} \right) \left( \frac{t}{n} \right)^\alpha} \right), \quad (2)$$

где  $\sigma$  – напряжение в деревянном элементе;  $E_M$  – мгновенный модуль упругости;  $E_g$  – длительный модуль упругости, который характеризует конечное упру-

го-эластическое состояние древесины;  $t$  – время нагружения;  $n$  – время релаксации;  $\alpha \leq 1$  – реологический коэффициент.

Авторы другой реологической модели [10] используют модель Бюргеса для описания процесса деформирования деревянных конструкций при прессовании. По мнению исследователей, деформация древесины зависит от вида функции напряжения  $\sigma$ . При постоянном напряжении полная относительная деформация древесины определяется как

$$\varepsilon = \left( \frac{E_1 + E_2}{E_1 \cdot E_2} + \frac{t}{\eta_3} - \frac{1}{E_2} \cdot e^{-\frac{E_2 t}{\eta_2}} \right) \sigma, \quad (3)$$

где  $E_1$  – модуль упругости;  $E_2$  – пластический модуль деформации;  $t$  – время нагружения;  $\eta_2$  – коэффициент, характеризующий вязкоупругую деформацию;  $\eta_3$  – вязкость, характеризующая затухание невосстанавливающейся пластической деформаций во времени.

Реологическим поведением древесины занимались исследователи из Германии и Швейцарии [6, 11–14]. В 2009 г. Thomas Gereke [6] в своем научном труде предложил реологическую модель древесины, в которой полная деформация суммировалась из нескольких составляющих, а именно: упругой, пластической, механо-сорбционной (mechanosorptive effect) и деформации, вызванной изменением влажности древесины. Позднее данная модель была усовершенствована исследователями Mohammad Masoud Hassani и др [13]. Они включили в нее еще одну составляющую деформации – вязкоупругую ползучесть. В настоящее время полная реологическая модель древесины состоит из следующих компонентов (рис. 3) [13]:

- упругая деформация  $\varepsilon^{el}$ ;
- невосстанавливающаяся пластическая деформация  $\varepsilon^{pl}$ ;
- деформация усушки или набухания, вызванная изменением влажности древесины  $\varepsilon^{\omega}$ ;
- деформация вязкоупругой ползучести  $\varepsilon_i^{ve}$ ;
- механо-сорбционная деформация  $\varepsilon_j^{ms}$ .

В итоге, тензор полной относительной деформации древесины состоит из пяти компонентов:

$$\varepsilon = \varepsilon^{el} + \varepsilon^{pl} + \varepsilon^{\omega} + \sum_{i=1}^n \varepsilon_i^{ve} + \sum_{j=1}^m \varepsilon_j^{ms}. \quad (4)$$

Потенциальная энергия деформации определяется как [13]

$$U = U(T, \omega, \varepsilon, \alpha_l) = f(T, \omega) + U^{el} + U^{ve} + U^{ms} + \frac{1}{2} \sum_{i=1}^r q_i \alpha_i, \quad (5)$$

где  $f(T, \omega)$  – функция, выражающая тепловую энергию (в исследованиях [13] влияние температуры на механические свойства древесины не учитывается);  $n$  и  $m$  – количество элементов Кельвина – Фойгта (см. раздел 2);  $U^{el}$ ,  $U^{ve}$ ,  $U^{ms}$  – потенциальная энергия упругой, вязкоупругой и механо-сорбционной деформации:

$$U^{el} = \frac{1}{2} \varepsilon^{el} : C_0 : \varepsilon^{el}; \quad (6)$$

$$U^{ve} = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n \varepsilon_i^{ve} : C_i : \varepsilon_i^{ve}; \quad (7)$$

$$U^{ms} = \frac{1}{2} \sum_{j=1}^m \varepsilon_j^{ms} : C_j : \varepsilon_j^{ms}, \quad (8)$$

где  $C_0$ ,  $C_i$ ,  $C_j$  – тензоры упругой, вязкоупругой и механо-сорбционной жесткости соответственно. Последнее слагаемое (5) обозначает энергию изотропного упрочнения, возникающую при невосстанавливающихся пластических деформациях (обозначение параметров  $q_i$  и  $\alpha_i$  – см. формулу (13)). Стоит отметить, что данная модель применяется только при бесконечно малых деформациях, и в случаях больших деформаций, при деформациях нелинейной вязкоупругости и при повреждении материала данная модель не актуальна [10].

Ниже дано краткое описание каждого компонента полной деформации.

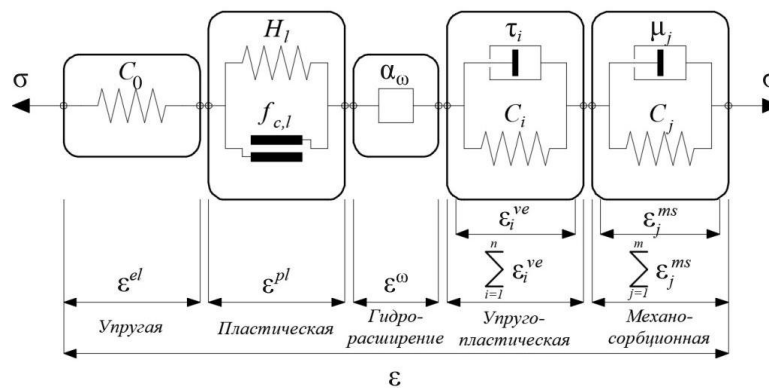


Рис. 3. Схематическая иллюстрация реологической модели древесины [13]

Fig. 3. A schematic illustration of the rheological wood model [13]

**Упругая деформация.** Упругая деформация представляет собой линейное и полностью восстанавливаемое поведение материала. Обобщенный закон Гука в матричной форме для данного тела записывается как

$$\sigma = C_0 : \varepsilon^{pl}, \quad (9)$$

где  $C_0$  – тензор упругих констант, который определяется для ортотропной среды древесины как

$$C_0 = \begin{pmatrix} E_R & -\frac{E_T}{\nu_{TR}} & -\frac{E_L}{\nu_{LR}} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{E_R}{\nu_{RT}} & E_T & -\frac{E_L}{\nu_{LT}} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{E_R}{\nu_{RL}} & -\frac{E_T}{\nu_{TL}} & E_L & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & G_{RT} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & G_{RL} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & G_{TL} \end{pmatrix}, \quad (10)$$

где  $R, T, L$  – анатомическое направление роста древесины: радиальное, тангенциальное продольное;  $\nu$  – коэффициент Пуассона;  $E$  – модуль упругости материала;  $G$  – модуль сдвига.

Все представленные упругие константы материала зависят от влажности древесины и могут быть определены по результатам лабораторных исследований [15]. Mohammad Masoud Hassani [13] предлагает применять линейную функцию и полиномиальную функцию третьей степени для описания изменения упругих констант материала в зависимости от влажности для *европейского бука*  $P_6$  и *норвежской ели*  $P_6$  соответственно:

$$P_6 = b_0 + b_1 \cdot \omega; \quad (11)$$

$$P_e = s_0 + s_1 \cdot \omega + s_2 \cdot \omega^2 + s_3 \cdot \omega^3. \quad (12)$$

Соответствующие коэффициенты для описания упругих констант материала авторы приводят в своих исследованиях [13].

**Пластическая деформация.** Прочностные и деформационные характеристики древесины сильно зависят от влажности, поэтому даже при небольших сочетаниях нагрузки с одновременным изменением влажности конструкции из древесины склонны накапливать необратимые пластические деформации. За последние десять лет были выполнены разные исследования для описания упругопластического поведения древесины. Проведен ряд экспериментов по одноосному и двухосному испытанию деревянных образцов на растяжение и сжатие при различной влажности древесины [16–18]. По результатам данных исследований были сформулированы следующие выводы:

1. Разрушение древесины при испытании деревянных образцов на растяжение и сдвиг характеризуется локальным хрупким разрушением, а при сжатии наблюдается неупругое поведение материала.

2. При испытании древесины на сжатие наблюдается две стадии деформирования образцов. Первая – в образцах древесины происходит клеточный коллапс, вторая – при больших пластических деформациях происходит уплотнение и прессование разрушенных клеток древесины.

3. Пластическое упрочнение древесины в различных анатомических направлениях слабо связано между собой, поскольку на клеточном уровне действуют различно ориентированные микромеханические зависимости.

Эти экспериментальные данные играют важную роль при выборе упругопластической модели, ее формы, типа поверхности текучести и их развития. В своих исследованиях Mohammad Masoud Hassani и другие предлагают использовать трехмерную ортотропную многоповерхностную модель пластичности, которая состоит из трех независимых механизмов разрушения по анатомическим направлениям при сжимающем нагружении [19]. Для того чтобы учесть влияние влажности древесины на развитие пластичности, все значения прочности и других соответствующих параметров определяются как величины, зависящие от влажности. В пространстве переход от упругой к пластической деформации характеризуется тремя функциями текучести в виде полиномиального критерия разрушения второго порядка [19]:

$$f_l(\sigma, \alpha_l, \omega) = a_l(\omega) : \sigma + \sigma : b_l(\omega) : \sigma + q_l(\alpha_l, \omega), \quad (13)$$

$$l = R, T, L,$$

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 [13];  $q_l$  – скалярное значение пластического упрочнения.

**Деформация усушки, набухания древесины.** При сушке древесины происходит перемещение влаги внутри материала (влагоперенос) и испарение влаги с поверхности материала в окружающую среду (лагоотдача). Основным параметром, характеризующим условия протекания этих процессов, является температура среды: при  $t < 100$  °C – низкотемпературная сушка, при  $t > 100$  °C – высокотемпературная сушка. Такое разделение обусловлено особенностями парообразования – испарением и кипением соответственно [21].

При уменьшении или увеличении влажности древесины происходит ее усушка или набухание. Для описания деформации при данных процессах используется подход, аналогичный температурному расширению материала. Изменение линейных размеров древесины в различных анатомических направлениях пропорционально приращению содержания влаги в древесине [13]:

$$\varepsilon^\omega = \alpha_\omega (\text{Min}(\omega, \omega_{FS}) - \omega_0), \quad (14)$$

где  $\omega$  – текущая влажность материала;  $\omega_{FS}$  – влажность деревянного образца, при значении которой не происходит усадка или набухание (по ряду источников данная величина колеблется в пределах от 28 до 30 % [22]);  $\omega_0$  – конечная влажность древесины. Вектор  $\alpha_\omega$  состоит из коэффициентов гидrorасширения и в системе координат *RTL* определяется как

$$\alpha_\omega = \{\alpha_R, \alpha_T, \alpha_L; 0, 0, 0\}. \quad (15)$$

Авторы [13] предполагают, что коэффициенты  $\alpha_R$ ,  $\alpha_T$ ,  $\alpha_L$  постоянны для каждого вида древесины и не зависят от уровня влажности. Значения коэффициентов приведены в [13].

**Вязкоупругая ползучесть.** При постоянном содержании влажности и при длительном нагружении в древесине возникает деформация вязкоупругой ползучести, зависящая от времени. Исследователи описывают вязкоупругое поведение древесины на полностью восстанавливаемом подходе путем последовательного соединения элементов по модели Кельвина – Фойгта [23–25]. Важно отметить, что сформулированный подход применим только в рамках линейной вязкоупругости и справедлив только для первичной стадии вязкоупругости.

Производная от функции полной потенциальной энергии (5) по вязкоупругой деформации для *i*-го элемента Кельвина – Фойгта:

$$\begin{aligned} \sigma_i^{ve} &= -\frac{\partial U}{\partial \varepsilon_i^{ve}} = \\ &= C_0 : \left( \varepsilon - \varepsilon^{pl} - \varepsilon^\omega - \sum_{i=1}^n \varepsilon_i^{ve} - \sum_{j=1}^m \varepsilon_j^{ms} \right) - C_i : \varepsilon_i^{ve} = \\ &= \sigma - C_i : \varepsilon_i^{ve}. \end{aligned} \quad (16)$$

В уравнении (16)  $C_i$  обозначает матрицу вязкоупругой жесткости. Скорость вязкоупругой деформации  $\dot{\varepsilon}_i^{ve}$  определяется как линейная функция в зависимости от главного вязкоупругого напряжения:

$$\dot{\varepsilon}_i^{ve} = \frac{1}{\tau_i} C_i^{-1} : \sigma_i^{ve}. \quad (17)$$

Тогда уравнение скорости для отдельного вязкоупругого элемента Кельвина – Фойгта имеет вид [13]

$$\dot{\varepsilon}_i^{ve} + \frac{1}{\tau_i} \varepsilon_i^{ve} = \frac{1}{\tau_i} C_i^{-1} : \sigma(t) \varepsilon_i^{ve} + \frac{1}{\tau_i} \varepsilon_i^{ve} = \frac{1}{\tau_i} C_i^{-1} : \sigma(t), \quad (18)$$

где  $C_i^{-1}$  – тензор вязкоупругой деформации;  $\tau_i$  – характеристическое время замедления, соответствующее *i*-му элементу Кельвина – Фойгта. В исследованиях [23–25] предполагается, что тензор вязкоупругой жесткости пропорционален тензору упругости:

$$\gamma_i^{ve} = \frac{C_0^{-1}}{C_i^{-1}}, \quad (19)$$

где  $\gamma_i^{ve}$  – безразмерный скаляр, коэффициент пропорциональности.

Для норвежской ели безразмерные коэффициенты в формуле (19) определены в [25], а для европейского бука данные коэффициенты вычисляются на основе измерения ползучести компонентов тензора вязкоупругой деформации при различной влажности древесины. Продольная составляющая тензора деформации ползучести для *i*-го элемента Кельвина – Фойгта определяется как

$$J_{iL}^{ve} = (J_{i1} \cdot \omega + J_{i0}) (1 - e^{-t/\tau_i}). \quad (20)$$

Отношение продольной составляющей тензора упругой деформации  $1/E_L$  к данной величине (17) дает значение коэффициента  $\gamma_i^{ve}$  для каждого элемента Кельвина – Фойгта соответственно. Ввиду малого количества проведенных экспериментальных исследований Mohammad Masoud Hassani и другие используют значение коэффициента пропорциональности  $\gamma_i^{ve}$ , измеренного в продольном направлении волокон, и для других анатомических направлений древесины. Следовательно, время замедления процесса определяется как для изотропного тела.

Согласно [23–25], в результате интегрирования (15), вязкоупругая деформация *i*-го элемента Кельвина – Фойгта определяется как

$$\varepsilon_{i,n+1}^{ve} = \varepsilon_{i,n}^{ve} \exp\left(-\frac{t}{\tau_i}\right) + \int_{t_n}^{t_{n+1}} \frac{C_i^{-1} : \sigma(t)}{\tau_i} \exp\left(-\frac{t_{n+1}-t}{\tau_i}\right) dt, \quad (21)$$

для шага времени  $\Delta t = t_{n+1} - t_n$  и тензоров вязкоупругой деформации  $\varepsilon_{i,n}^{ve}$  и  $\varepsilon_{i,n+1}^{ve}$  в момент времени  $t_n$  и  $t_{n+1}$  соответственно.

**Механо-сорбционная деформация ползучести** – 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 (рис. 4).

Экспериментальные исследования механо-сорбционной деформации для норвежской ели можно найти в [26–28]. Для европейского бука такие исследования не проводились. Для численного описания данного вида деформации используется модель Кельвина – Фойгта. Ряд исследователей [23, 24] считают, что механо-сорбционная деформация является частью пластической деформации древесины. Однако S. Fortino и др. разделяют пластическую и механо-сорбционную деформацию на два отдельных вида [25].

Производная от функции полной потенциальной энергии (5) по механо-сорбционной деформации ползу-

части имеет вид

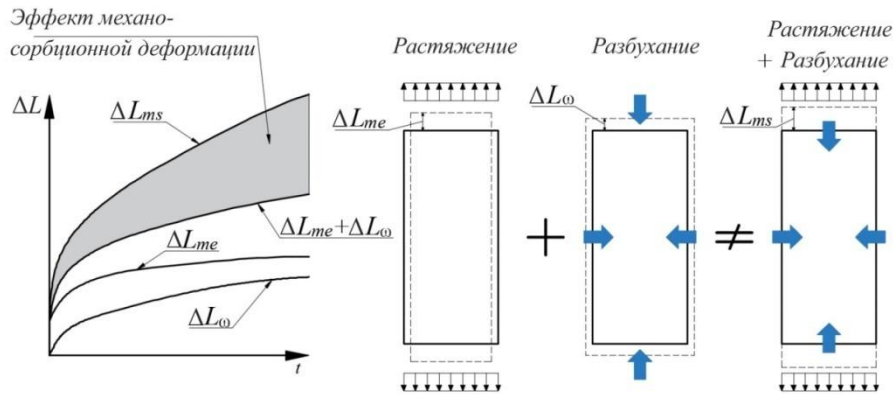


Рис. 4. Эффект механо-сорбционной деформации:  $\Delta L_{me}$ ,  $\Delta L_{\omega}$ ,  $\Delta L_{ms}$  – деформация деревянных элементов при растяжении, разбухании и при одновременном действии растягивающей нагрузки и процесса разбухания древесины соответственно [13]

Fig. 4. The effect of mechanical and sorption deformation:  $\Delta L_{me}$ ,  $\Delta L_{\omega}$ ,  $\Delta L_{ms}$ , the deformation of wooden elements under tension, swelling and at a simultaneous action of tensile load and wood swelling process, respectively [13]

$$\sigma_j^{ms} = -\frac{\partial U}{\partial \varepsilon_j^{ms}} = C_0 : \left( \varepsilon - \varepsilon^{pl} - \varepsilon^{\omega} - \sum_{i=1}^n \varepsilon_i^{ve} - \sum_{j=1}^m \varepsilon_j^{ms} \right) - C_j : \varepsilon_j^{ms} = \sigma - C_j : \varepsilon_j^{ms}, \quad (22)$$

где  $C_j$  – механо-сорбционный тензор жесткости. Для описания механо-сорбционной деформации используется уравнение скорости, аналогичное уравнению для вязкоупругой ползучести (14), и определяется как

$$\dot{\varepsilon}_j^{ms} = \frac{|\dot{\omega}|}{\mu_j} C_j^{-1} : \sigma_j^{ms}. \quad (23)$$

В (23)  $\mu_j$  называется характеристической влажностью, по аналогии с характеристическим временем замедления вязкоупругой деформации;  $C_j^{-1}$  – тензор механо-сорбционной деформации, соответствующий  $j$ -му элементу Кельвина – Фойгта. Подставив (22) в (23) и выполнив некоторые преобразования, мы получим основное уравнение механо-сорбционной деформации для одного элемента по модели Кельвина – Фойгта:

$$\dot{\varepsilon}_j^{ms} + \frac{|\dot{\omega}|}{\mu_j} \varepsilon_j^{ms} = \frac{|\dot{\omega}|}{\mu_j} C_j^{-1} : \sigma(t). \quad (24)$$

Следует отметить тот факт, что решение уравнения (24) аналогично решению (18), но вместо приращения по времени используется величина изменения абсолютного содержания влаги в древесине. Тогда механо-сорбционная деформация определяется как

$$\varepsilon_{j,n+1}^{ms} = \varepsilon_{j,n}^{ms} \exp\left(-\frac{\Delta\omega}{\mu_j}\right) + \int_{\omega_n}^{\omega_{n+1}} \frac{C_j^{-1} : \sigma(t)}{\mu_j} \exp\left(-\frac{\omega_{n+1} - \omega(t)}{\mu_j}\right) d|\omega(t)|. \quad (25)$$

Здесь  $|\Delta\omega| = |\omega_{n+1} - \omega_n|$  – значение абсолютного приращения влажности;  $\varepsilon_{j,n}^{ms}$  и  $\varepsilon_{j,n+1}^{ms}$  обозначает механо-сорбционную деформацию в момент времени  $t_n$  и  $t_{n+1}$  соответственно.

Для поэлементного расчета механо-сорбционной деформации используется тот же подход, что и для вязкоупругой деформации ползучести. Определяются соответствующие скалярные коэффициенты  $\gamma_j^{ms}$ , которые получены на основе продольной и тангенциальной составляющих тензора механо-сорбционной деформации ползучести [25]:

$$\gamma_j^{ms} = \frac{C_0^{-1}}{C_j^{-1}}. \quad (26)$$

В работе [25] по экспериментальным исследованиям [29, 30] проанализированы значения для трех серийных элементов Кельвина – Фойгта и получен механо-сорбционный тензор деформации:



$$C_j^{-1} = \begin{pmatrix} \frac{J_{jT0}^{ms} E_{T0}}{E_R} & -\frac{J_{jT0}^{ms} E_{T0} \nu_{TR}}{E_T} & -\frac{J_{jT0}^{ms} E_{T0} \nu_{LR}}{E_L} & 0 & 0 & 0 \\ \frac{J_{jT0}^{ms} E_{T0} \nu_{KT}}{E_R} & \frac{J_{jT0}^{ms} E_{T0}}{E_T} & -\frac{J_{jT0}^{ms} E_{T0} \nu_{LT}}{E_L} & 0 & 0 & 0 \\ \frac{J_{jT0}^{ms} E_{T0} \nu_{RL}}{E_R} & -\frac{J_{jT0}^{ms} E_{T0} \nu_{TL}}{E_T} & J_{jL}^{ms} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{J_{jT0}^{ms} E_{T0}}{G_{KT}} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{J_{jT0}^{ms} E_{T0}}{G_{KT}} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{J_{jT0}^{ms} E_{T0}}{G_{KT}} \end{pmatrix} \quad (27)$$

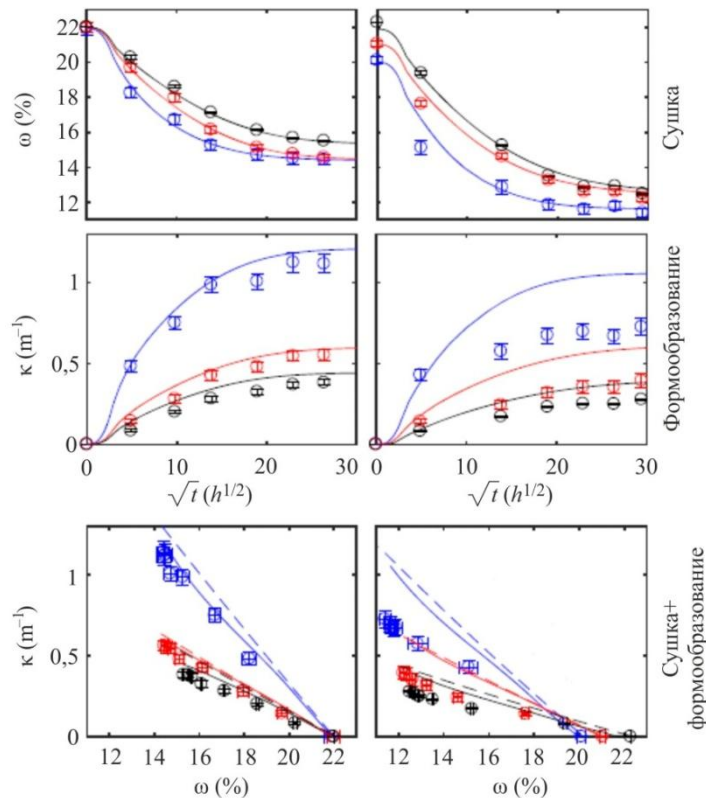
Все значения  $J_{jT0}^{ms}$  и  $J_{jL}^{ms}$  вместе с характеристиками влажности  $\mu_j$  представлены в [13]. Ввиду отсутствия экспериментальных исследований механо-сорбционной деформации *европейского бука* соответствующие значения тензора механо-сорбционной деформации для данного вида древесины были определены Р. Niemz и другими путем масштабирования соответствующих значений для *норвежской ели* в зависимости от отношения плотностей двух видов древесины [31].

Анализируя реологические модели поведения древесины, которые были предложены отечественными и зарубежными исследователями, можно сделать вывод о том, что в предложенной европейскими учеными реологической модели поведения древесины наиболее полно учитывается анизотропия материала, деформация усушки и набухания древесины, а также механо-сорбционная деформация ползучести. Именно исследование процесса усушки и набухания древесины имеет большое значение для практического применения метода самоформирования клееных слоистых деревянных конструкций.

### 3. Апробация реологической модели древесины

На основе вышеописанной модели было выполнено численное моделирование процесса деформации деревянных балок с целью верификации реологической модели с натурными экспериментальными исследованиями [6]. Для этого по технологии самоформирования были изготовлены несколько криволинейных деревянных балок (рис. 2) длиной 600 мм, шириной 100 мм и высотой 15, 30 и 45 мм (образцы 1, 2 и 3 соответственно). Отношение толщины активного слоя к пассивному составляло 1:2. Активный слой был выполнен из цельной доски длиной 600 мм и шириной 100 мм, а пассивный слой из досок длиной 250 мм и шириной 100 мм. В качестве исходного материала были использованы два сорта древесины: *европейский бук* и *норвежская ель*. Активный слой был увлажнен до 95,0 % и 85,0 % для *европейского бука* и *норвежской ели* соответственно. Сушка проводилась в течение 900 ч в естественных условиях при температуре воздуха 20 °С и влажности воздуха 65,0 % для *европейского бука* и 55,0 % для *норвежской ели*. Для склеивания был использован полимерный клеевой состав. Кроме этого, исследователи также выполнили аналитический и численный расчет деформации клееных слоистых деревянных конструкций, изготовленных методом самоформирования.

Результаты натурных экспериментов, численного моделирования и аналитических расчетов приведены на рис. 5 [6].





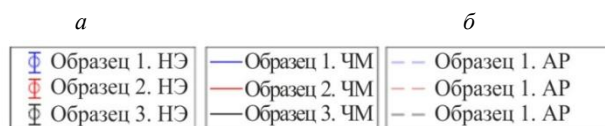


Рис. 5. Результаты натурных экспериментов (НЭ), численного моделирования (ЧМ) и аналитических расчетов (АР): а – европейский бук; б – норвежская ель [6]

Fig. 5. The field experimental results, numerical modeling and analytical calculations: а is a European beech; б is a Norway spruce [6]

Анализируя полученные результаты определения деформаций клееных слоистых деревянных балок в натурных и вычислительных экспериментах с использованием реологической модели [13], можно отметить следующее:

- для обоих сортов рассмотренных пород древесины зависимости изменения влажности от времени в процессе сушки древесины, полученные при проведении натурального эксперимента и в результате численного моделирования, близки между собой;
- для европейского бука зависимости изменения кривизны (формоизменения) балки от времени и влажности древесины, полученные при проведении натурального эксперимента и в результате численного моделирования, близки между собой, однако для норвежской ели вышеуказанные зависимости различаются: конечное значение кривизны балки по результатам численного моделирования больше, чем аналогичное значение кривизны, полученное при проведении натурального эксперимента.

#### 4. Анализ и перспективы развития реологической модели

В результате проведенного сравнительного анализа современных реологических моделей древесины, предложенных или описанных отечественными и зарубежными учеными, а также имеющихся результатов экспериментальных исследований и численного моделирования процесса самоформообразования клееных слоистых деревянных конструкций установлено, что реологическая модель, включающая в себя наиболее полный перечень факторов, влияющих на деформацию древесины (упругую и пластическую деформации, усушку или разбухание древесины, деформацию вязкоупругой ползучести и механо-сорбционную деформацию), достаточно корректно описывает процесс деформирования древесины и является наиболее перспективной для создания сложных архитектурных форм конструкций из клееной древесины.

Несмотря на достоинства этой модели, следует отметить ряд ее недостатков, которые в основном связаны с отсутствием экспериментальных исследований и учетом некоторых факторов, а именно:

- не учитывается изменение механических характеристик древесины при изменении ее температуры в процессе сушки;
- клеевой слой рассматривается как поверхность, препятствующая перемещению влаги из активного

в пассивный слой, тогда как ряд зарубежных ученых отмечают влияние клеевого состава на процесс деформирования клеено-деревянной конструкции [32, 33];

- при определении деформаций усушки или разбухания не учитывается влияние геометрических размеров деревянных элементов активных и пассивных слоев конструкции (длина, ширина и толщина);

- при определении деформации вязкоупругой ползучести время замедления определяется как для изотропного материала, поскольку к настоящему времени имеются экспериментальные исследования по изучению деформации вязкоупругой ползучести только в продольном направлении волокон древесины;

- при определении тензора механо-сорбционной деформации для европейского бука использовался метод масштабирования соответствующих значений для норвежской ели, поскольку для европейского бука на данный момент отсутствуют экспериментальные исследования;

- результаты численного моделирования процесса деформации деревянных элементов, полученные на основе реологической модели для европейского бука, близки с результатами натурных экспериментов, а для норвежской ели они различаются, т.е. необходим учет породы древесины.

Таким образом, требуются дополнительные экспериментальные и теоретические исследования механического поведения клееных деревянных конструкций, учитывающие указанные факторы, а также необходимо рассмотреть и другие породы древесины, в том числе их комбинации.

#### Заключение

Обобщая все преимущества и недостатки реологической модели древесины [13], можно говорить о том, что эта модель достаточно корректно описывает процесс деформирования древесины и является перспективной базой для создания сложных архитектурных форм и уникальных объектов из клееной древесины.

Причины расхождения расчетных и теоретических значений деформации образцов из разных пород древесины могут быть связаны с ее строением, анизотропией и учетом некоторых факторов, таких как температура, клеевой слой и его состав, геометрические размеры активных слоев.

Дальнейшее направление исследования механического поведения древесины будет связано авторами

с уточнением реологической модели древесины, прове-

дением натуральных и вычислительных экспериментов.

### Библиографический список

1. Калугин А.В. Деревянные конструкции: учеб. пособие. – М.: Изд-во АСВ, 2008. – 288 с.
2. Соболев Ю.С. Древесина как конструкционный материал. – М.: Лесная пром-сть, 1979. – 248 с.
3. Пятикрестовский К.П. Нелинейные методы механики в проектировании современных деревянных конструкций. – М.: Изд-во МИСИ-МГСУ, 2017. – 320 с.
4. Конструкции из дерева и пластмасс: учебник / Э.В. Филимонов [и др.]. – М.: Изд-во АСВ, 2010. – 440 с.
5. Чудинов Б.С. Вода в древесине. – Новосибирск: Наука, 1984. – 270 с.
6. 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, no. 9. – URL: <https://advances.sciencemag.org/content/5/9/eaax1311> (дата обращения: 08.02.2020). DOI: 10.1126/sciadv.aax1311.
7. Тимошенко С.П., Лессельс Дж. Прикладная теория упругости. – Л.: Гос. техн. изд-во, 1931. – 394 с.
8. Тюлева Е.М. Уточнение реологической модели древесины // *Хвойные бореальной зоны*. – 2008. – № 1–2. – С. 179–183.
9. Юдин Р.В., Василенко А.С. Математическая модель реологических явлений деформирования древесины для изготовления шпал // *Актуальные направления научных исследований XXI века: теория и практика*. – Воронеж, 2017. – С. 301–306.
10. Кучер С.В., Теппов А.В., Чураков А.В. Реологическая модель древесины при затухающих необратимых деформациях // *Научно-техническая конференция института ехнологических машин и транспорта леса Санкт-Петербургского государственного лесотехнического университета по итогам научно-исследовательских работ 2017 года*. – СПб., 2018. – С. 6–13.
11. Vidal-Sallé E., Chassagne P. Constitutive equations for orthotropic nonlinear viscoelastic behaviour using a generalized Maxwell model Application to wood material // *Mech Time-Depend Mater*. – 2007. – Vol. 11. – P. 127–142. DOI: 10.1007/s11043-007-9037-2.
12. Gereke. T. Moisture-induced stresses in cross-laminated wood panels // *Swiss Federal Institute of Technology*. – 2009.
13. Rheological model for wood / M.M. Mohammad Masoud Hassani, F.K. Wittel, S. Hering, H.J. Herrmann // *Comput. Methods Appl. Mech. Engrg.* – 2014. – Vol. 283. – P. 1032–1060. DOI.org/10.1016/j.cma.2014.10.031.
14. Hanhijarvi A. Advances in the knowledge of the influence of moisture changes on the long-term mechanical performance of timber structures // *Materials and Structures*. – 2000. – Vol. 33. – P. 43–49.
15. Hering S., Keunecke D., Niemz P. Moisture-dependent orthotropic elasticity of beech wood // *Wood Sci Technol*. – 2012. – Vol. 46. – P. 927–938.
16. Eberhardsteiner J. Mechanisches Verhalten von Fichtenholz: Experimentelle Bestimmung der biaxialen Festigkeitseigenschaften. – Wien: Springer-Verlag, 2002. – 174 p. DOI: 10.1007/978-3-7091-6111-1
17. Fleischmann M., Eberhardsteiner J., Ondris L. Experimental Investigation of Spruce Wood in Different Material Directions and Constitutive Modelling Including Knot Effects // *20th Danubia-Adria Symposium on Experimental Methods in Solid Mechanics*. – Danubia-Adria, 2003.
18. Numerische Berechnung von Holzkonstruktionen unter Verwendung eines orthotropen elasto-plastischen Werkstoffmodells / M. Fleischmann, H. Krenn, J. Eberhardsteiner, G. Schickhofer // *Holz Roh Werkst*. – 2007. – Vol. 65. – P. 301–313. DOI: 10.1007/s00107-007-0185-5
19. Schmidt J., Kaliske M. Models for numerical failure analysis of wooden structures // *Engineering Structures*. – 2009. – Vol. 31. – P. 571–579. DOI: 10.1016/j.engstruct.2008.11.001
20. Tsai S.W., Wu E.M. A general theory of strength for anisotropic materials, composite materials // *Journal of Composite Materials*. – 1971. – Vol. 3. – P. 53–80. DOI: 10.1177/002199837100500106
21. Конструкции из дерева и пластмасс / Ю.В. Слищковых [и др.]. – М.: СТРОЙИЗДАТ, 1986. – 545 с.
22. Пейч Н.Н., Царев Б.С. Сушка древесины. – М.: Изд-во Высшая школа, 1971. – 220 с.
23. Hanhijarvi A., Mackenzie-Helnwein P. Computational analysis of quality reduction during drying of lumber due to irrecoverable deformation. I: Orthotropic viscoelastic-mechano-sorptive-plastic material model for the transverse plane of wood // *ASCE Journal of engineering mechanics*. – 2003. – Vol. 129. – P. 996–1005. DOI: 10.1061/(ASCE)0733-9399(2003)129:9(996)
24. Hanhijarvi A., Mackenzie-Helnwein P. Computational analysis of quality reduction during drying of lumber due to irrecoverable deformation. II: Algorithmic aspects and practical application // *ASCE Journal of engineering mechanics*. – 2003. – Vol. 129. – P. 1006–1016. DOI: 10.1061/(ASCE)0733-9399(2003)129:9(1006)
25. Fortino S., Mirianon F., Toratti T. A 3D moisture-stress FEM analysis for time dependent problems in timber structures // *Mech Time-Depend Mater*. – 2009. – Vol. 13. – P. 333–356. DOI: 10.1007/s11043-009-9103-z
26. Ranta-Maunus A. The viscoelasticity of wood at varying moisture content // *Wood Science and Technology*. – 1975. – Vol. 9. – P. 189–205.
27. Martensson A. Creep behavior of structural timber under varying humidity conditions // *Wood and fiber science*. – 1986. – Vol. 18. – P. 468–477.
28. Hanhijarvi A. Deformation properties of Finnish spruce and pine wood in tangential and radial directions in association to high temperature drying. Part III. Experimental results under drying conditions (mechano-sorptive creep) // *Springer-Verlag*. – 2000. – Vol. 58. – P. 63–71. DOI: 10.1007/s001070050
29. Toratti T. Creep of timber beams in a variable environment // *Espoo*. – 2009.
30. Toratti T., Svensson S. Mechanical response of wood perpendicular to grain when subjected to changes of humidity // *Wood Science and Technology*. – 2002. – Vol. 36. – P. 145–156. DOI: 10.1007/s00226-001-0130-4
31. Niemz P. Physik des Holzes und der Holzwerkstoffe // *DRW-Verlag*. – 1993. – 243 p.
32. Adhesive-related warping of thin wooden bi-layers / A. Rindler, O. Vay, C. Hansmann, J. Konnerth // *Wood Science and Technology*. – 2019. – Vol. 53. – P. 1015–1033. DOI: 10.1007/s00226-019-01124-w
33. Influence of moisture on stress-strain behavior of adhesives used for structural bonding of wood / O. Klausler, S. Clauß, L. Lubke, J. Trachsel, P. Niemz // *International Journal of Adhesion & Adhesives*. – 2013. – Vol. 44. – P. 57–65. DOI: 10.1016/j.ijadhadh.2013.01.015

## References

1. Kalugin A.V. Dereviannye konstruksii: ucheb. posobie [Wooden construction: educational book]. Moscow, *Izd-vo ACB*, 2008, 288 p.
2. Sobolev Iu.S. Drevesina kak konstruksionnyi material [Wood as a construction material]. Moscow, *Lesnaia prom-st'*, 1979, 248 p.
3. Piatikrestovskii K.P. Nelineinye metody mekhaniki v proektirovanii sovremennykh dereviannykh konstruksii [Nonlinear methods of mechanics in the design of modern wooden structures]. Moscow, *Izd-vo MISI-MGSU*, 2017, 320 p.
4. Je.V. Filimonov Je.L. at el. Konstruksii iz dereva i plastmass: Uchebnik [Structures made of wood and plastics: Tutorial]. Moscow, *ACB*, 2010, 440 p.
5. Chudinov B.S. Voda v drevesine [The water in the wood]. Novosibirsk, *Izd-vo Nauka*, 1984, 270 p.
6. Grönquist P., Wood D., Hassani M.M., Wittel F.K., Menges A., Rüggeberg M. Analysis of hygroscopic self-shaping wood at large scale for curved mass timber structures. *Science Advances*, 2019, vol. 5, no. 9, DOI: 10.1126/sciadv.aax1311.
7. Timoshenko S.P., Lessel's Dzh. Prikladnaja teorija uprugosti [Applied theory of elasticity]. Leningrad, Gosudarstvennoe tehnikeskoe izdatel'stvo, 1931, 394 p.
8. Tiuleva E.M. Utochnenie reologicheskoi modeli drevesiny [Clarification of the rheological wood model]. *Khvoinye boreal'noi zony*, 2008, vol. 1-2, 179-183 p.
9. Iudin R.V., Vasilenko A.S. Matematicheskaja model' reologicheskikh iavlenii deformirovaniia drevesiny dlia izgotovleniia shpal [Mathematical model of rheological phenomena of wood deformation for the production of sleepers]. *Aktual'nye napravleniia nauchnykh issledovanii XXI veka: teoriia i praktika* (Current directions of scientific research of the XXI century: theory and practice). Voronezh, 2017, pp. 301-306.
10. Kucher S.V., Teppoev A.V., Churakov A.V. Reologicheskaja model' drevesiny pri zatukhaiushchikh neobratimnykh deformatsiiakh [Rheological model of wood at decaying irreversible deformations]. *Nauchno-tehnicheskaja konferentsiia instituta tekhnicheskikh mashin i transporta lesa sankt-peterburgskogo gosudarstvennogo lesotekhnicheskogo universiteta po itogam nauchno-issledovatel'skikh rabot 2017 goda* (Scientific and Technical Conference of the Institute of Technological Machines and Forest Transport of St. Petersburg State Forestry University on the Results of Research Works of 2017). Saint-Petersburg, 2018, pp. 6-13.
11. Vidal-Sallé E., Chassagne P. Constitutive equations for orthotropic nonlinear viscoelastic behaviour using a generalized Maxwell model Application to wood material. *Mech Time-Depend Mater*, 2007, vol. 11, pp 127-142. DOI 10.1007/s11043-007-9037-2.
12. Gereke. T. Moisture-induced stresses in cross-laminated wood panels, *Swiss Federal Institute of Technology*, 2009.
13. Mohammad Masoud Hassani M.M., Wittel F.K., Hering S., Herrmann H.J. Rheological model for wood. *Comput. Methods Appl. Mech. Engrg.*, 2014, vol. 283, pp. 1032-1060. DOI.org/10.1016/j.cma.2014.10.031.
14. Hanhijarvi A. Advances in the knowledge of the influence of moisture changes on the long-term mechanical performance of timber structures. *Materials and Structures*, 2000, vol. 33, pp. 43-49.
15. Hering S., Keunecke D., Niemz P. Moisture-dependent orthotropic elasticity of beech wood. *Wood Sci Technol*, 2012, vol. 46, pp. 927-938.
16. Eberhardsteiner J. Mechanisches Verhalten von Fichtenholz: Experimentelle Bestimmung der biaxialen Festigkeitseigenschaften. *Springer-Verlag Wien*, 2002, 174 p. DOI: 10.1007/978-3-7091-6111-1.
17. Fleischmann M., Eberhardsteiner J., Ondris L. Experimental Investigation of Spruce Wood in Different Material Directions and Constitutive Modelling Including Knot Effects. *20th Danubia-Adria Symposium on Experimental Methods in Solid Mechanics*, 2003, pp. 14-15.
18. Fleischmann M., Krenn H., Eberhardsteiner J., Schickhofer G. Numerische Berechnung von Holzkonstruktionen unter Verwendung eines orthotropen elasto-plastischen Werkstoffmodells. *Holz Roh Werkst*, 2007, vol. 65, pp. 301-313. DOI: 10.1007/s00107-007-0185-5.
19. Schmidt J., Kaliske M. Models for numerical failure analysis of wooden structures. *Engineering Structures*, 2009, vol 31, pp. 571-579. – DOI:10.1016/j.engstruct.2008.11.001.
20. Tsai S.W., Wu E.M. A General Theory of Strength for Anisotropic Materials, *Composite Materials. Journal of Composite Materials*, 1971, vol 3, pp. 53 – 80. DOI: 10.1177/002199837100500106.
21. Slickouhov Ju.V. at el. Konstruksii iz dereva i plastmass [Structures made of wood and plastics]. Moscow, *STROJIZDAT*, 1986, 545 p.
22. Peich N.N., Tsarev B.S. Sushka drevesiny [Wood drying]. Moscow, *Izd-vo Vysshaja shkola*, 1971, 220 p.
23. A. Hanhijarvi A., Mackenzie-Helnwein P. Computational Analysis of Quality Reduction during Drying of Lumber due to Irrecoverable Deformation. I: Orthotropic Viscoelastic-Mechanosorptive-Plastic Material Model for the Transverse Plane of Wood. *ASCE Journal of engineering mechanics*, 2003, vol. 129, pp. 996-1005. DOI: 10.1061/(ASCE)0733-9399(2003)129:9(996).
24. Hanhijarvi A., Mackenzie-Helnwein P. Computational Analysis of Quality Reduction during Drying of Lumber due to Irrecoverable Deformation. II: Algorithmic Aspects and Practical Application. *ASCE Journal of engineering mechanics*, 2003, vol. 129, pp. 1006-1016. DOI: 10.1061/(ASCE)0733-9399(2003)129:9(1006).
25. Fortino S., Mirianon F., Toratti T. A 3D moisture-stress FEM analysis for time dependent problems in timber structures. *Mech Time-Depend Mater*, 2009, vol. 13, pp. 333-356. DOI: 10.1007/s11043-009-9103-z.
26. Ranta-Maunus A. The viscoelasticity of wood at varying moisture content. *Wood Science and Technology*, 1975, vol. 9, pp. 189-205.
27. Martensson A. Creep Behavior of Structural Timber under Varying Humidity Conditions. *Wood and fiber science*, 1986, vol. 18, pp. 468-477.
28. Hanhijarvi A. Deformation properties of Finnish spruce and pine wood in tangential and radial directions in association to high temperature drying. Part III. Experimental results under drying conditions (mechano-sorptive creep). *Springer-Verlag*, 2000, vol. 58, pp. 63-71. DOI: 10.1007/s001070050.
29. Toratti T. Creep of timber beams in a variable environment. *Espoo*, 2009.
30. Toratti T., Svensson S. Mechanical response of wood perpendicular to grain when subjected to changes of humidity. *Wood Science and Technology*, 2002, vol. 36, pp. 145-156. DOI: 10.1007/s00226-001-0130-4.
31. Niemz P., Physik des Holzes und der Holzwerkstoffe. *DRW-Verlag*, 1993, 243 p.
32. Rindler A., Vay O., Hansmann C., Konnerth J. Adhesive-related warping of thin wooden bi-layers. *Wood Science and Technology*, 2019, vol. 53, pp. 1015-1033. DOI: 10.1007/s00226-019-01124-w.
33. Klausler O., Clauß S., Lubke L., Trachsel J., Niemz P. Influence of moisture on stress-strain behavior of adhesives used for structural bonding of wood. *International Journal of Adhesion & Adhesives*, 2013, vol. 44, pp. 57-65. DOI: 10.1016/j.ijadhadh.2013.01.015.