



УДК 694.12

Б. Э. ШАРЫНИН, аспирант кафедры строительных конструкций и водоснабжения

**ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ВЛАГИ
В СОЕДИНЕНИЯХ ДЕРЕВЯННЫХ КОНСТРУКЦИЙ НА
МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ЗУБЧАТЫХ ПЛАСТИНАХ**

ФГБОУ ВО «Поволжский государственный технологический университет»

Россия, 424000, г. Йошкар-Ола, пл. Ленина, д. 3.

Тел.: (8362)68-78-65; (917)9780128; эл. почта: bogdan.sharynin@yandex.ru

Ключевые слова: численное моделирование, соединения деревянных конструкций, металлические зубчатые пластины (МЗП), условия эксплуатации, влагоперенос в древесине.

Выполнен анализ распределения влаги в опорном узле стропильной фермы с соединениями на металлических зубчатых пластинах при экстремальном увлажнении с применением численного моделирования, а также сформулирована модель теплопроводности древесины с учетом ограничений программного обеспечения.

В вопросе снижения расчетных характеристик в зависимости от условий эксплуатации, в частности эксплуатационной влажности древесины либо относительной влажности воздуха, между отечественными и зарубежными методиками существуют отличия. Например, в США [1] при длительной эксплуатации с равновесной влажностью древесины более 19 %, используется понижающий коэффициент к несущей способности металлических зубчатых пластин (МЗП) (рис. 1) равный 0,8. В Канаде [3] принято деление на сухие и влажные условия эксплуатации. Условия считаются сухими, когда равновесная влажность менее 19 %, при этом среднегодовое значение не более 15 %. Коэффициент условий работы для влажных условий равен 0,67, а для конструкций, которые эксплуатируются в сухих условиях, но были изготовлены во влажных, такой коэффициент принимают равным 0,8. В Европе [3] предусмотрено три класса эксплуатации: первый – при влажности воздуха > 65 % не более нескольких недель в году (равновесная влажность < 12 %), второй – при влажности воздуха > 85 % не более нескольких недель в году (равновесная влажность от 12 до 20 %), третий класс назначается при равновесной влажности > 20 %. При этом коэффициент для условий эксплуатации совмещен с коэффициентом длительности нагрузки, т. е. в нормативном документе приводится их произведение.

Действующая методика расчета таких конструкций в РФ описана в своде правил [4] и учитывает условия их работы в зависимости от температуры, влажности, режима нагружения, обработки защитными составами, сроков эксплуатации и напряженно-деформированного состояния. Эффективность методики с точки зрения безопасности подтверждена многолетним опытом эксплуатации объектов со стропильными фермами на МЗП, первые из которых были возведены в 1970-х годах. Таким образом, нагрузки и воздействия, которые



были учтены при проектировании конструкции, не ведут к снижению расчетного срока эксплуатации.

Однако не все аспекты можно учесть в расчете при проектировании. Так, наиболее распространенным дефектом при эксплуатации несущих конструкций кровель является нарушение герметичности кровельного покрытия, что приводит к нарушению параметров эксплуатационной влажности древесины и выходу условий эксплуатации конструкции за расчетные пределы. Наиболее уязвимыми в данном плане являются оперные узлы, так как несут максимальную нагрузку, находятся на самой нижней высотной отметке по отношению к остальным элементам конструкции, а также имеют наибольшие площади торцевых спилов.

Целью данного исследования является анализ распределения влаги в опорном узле стропильной фермы при экстремальном увлажнении с применением численного моделирования.

Для достижения цели необходимо разрешить следующие задачи:

1. Сформулировать модель влагопроводности древесины с учетом ограничений среды *AnsysFluent 2023R1*.
2. Оценить адекватность модели путем сопоставления с результатами эксперимента аналитическими методами.
3. Произвести численное моделирование процесса увлажнения.
4. Проанализировать результаты численного моделирования.

Древесина, применяемая в строительных конструкциях, относится к капиллярно-коллоидным пористым телам, так как изменяет размер при удалении влаги и становится хрупкой при высушивании, а также имеет ограниченное набухание [5]. Влагоперенос в древесине подразделяют на диффузию, термодиффузию и фильтрацию – перенос зависимости от движущей силы. Ввиду того, что процесс переноса может сопровождаться фазовым переходом, проведение четкой границы между путями представляется практически неразрешимым [6]. Древесина сосны, наиболее часто используемой хвойной породы в строительстве, на 94 % состоит из клеток прямоугольного сечения длиной 3–5 мм, поперечными размерами 20–40 мкм и имеющими от 1 до 12 отверстий диаметром 4–8 нм. Так как проводимость древесины хвойных пород вдоль волокон в 10–15 раз выше [7], чем в поперечных направлениях, а в соединениях торцевые спилы представляют значительную часть площади, то далее в рамках опорного узла (рис. 2) с МЗП размерами 364,25×175,5×1 мм будем рассматривать проводимость вдоль волокон. Оснач Н. А. установил [8], что на проницаемость древесины как коллоидного капиллярно-пористого тела влияют форма, размеры и состояние элементов, выполняющих водопроводящие функции, а также то, что у хвойных пород при увеличении гигроскопической влаги снижется воздухопроводность, которая связана с проницаемостью (1).

Различные данные о размерах элементов строения древесины [9], а также ее неоднородность и наличие тупиковых капилляров и глухих пор не позволяют задать точную величину радиуса капилляров для определения капиллярного потенциала.

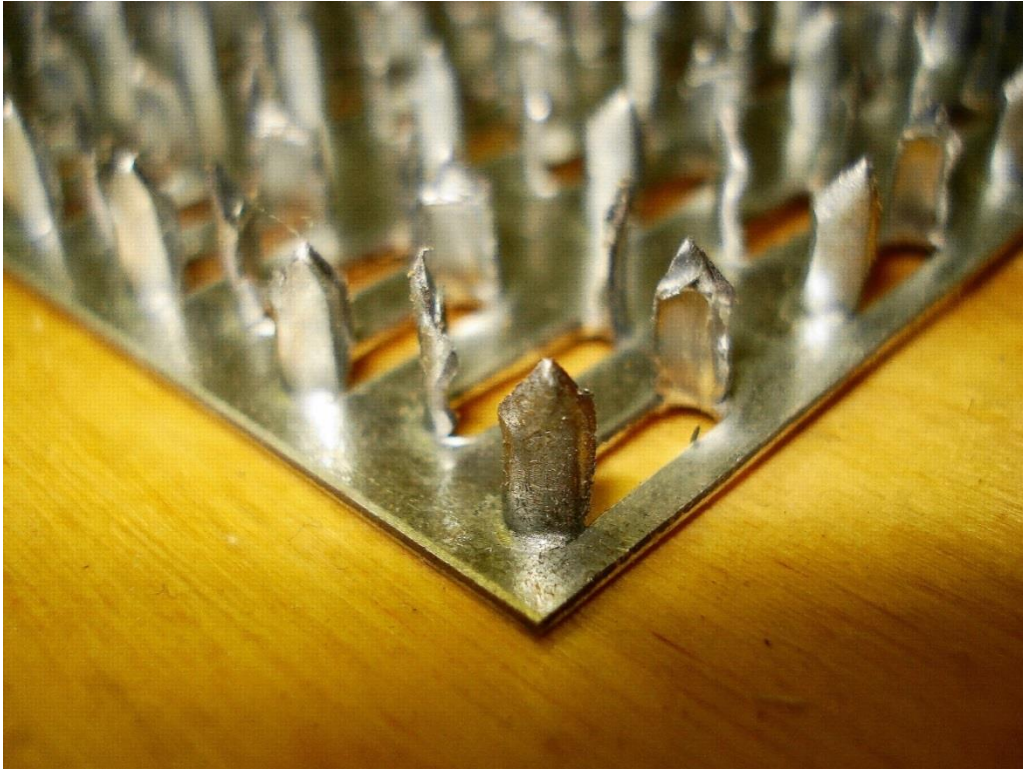


Рис. 1. Фото металлической зубчатой пластины

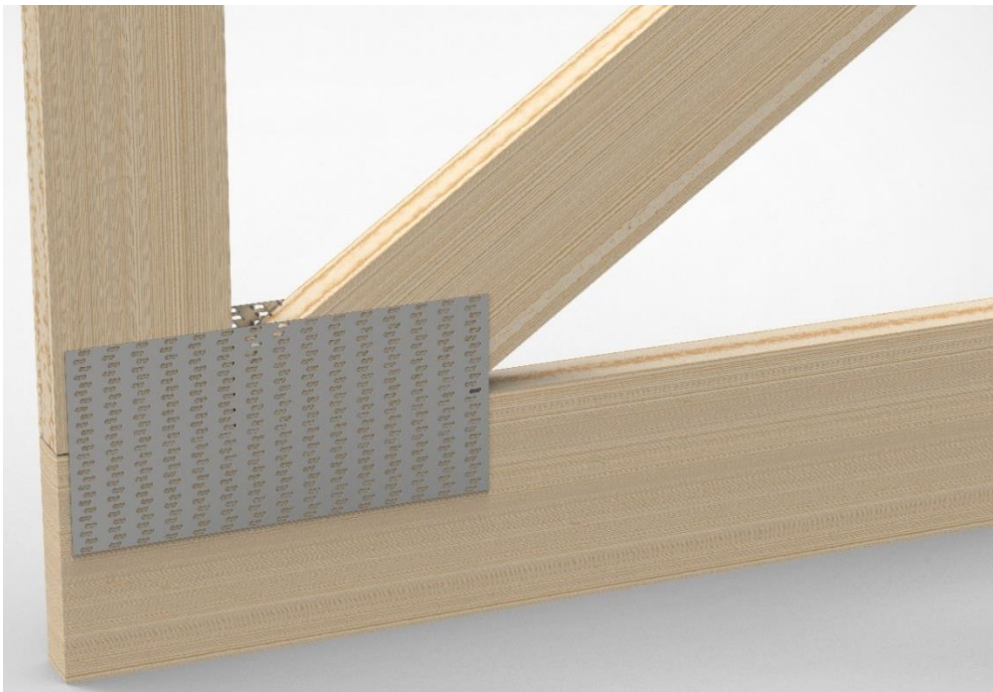


Рис. 2. Опорный узел стропильной фермы



Коэффициент проницаемости

$$C = \frac{\eta \Delta Q l}{\Delta S (P_1 - P_2)}, \text{ см}^2 \quad (1)$$

где ΔQ – секундный объемный расход, $\text{см}^3/\text{с}$; l – длина образца, см ; P_1 – давление на входе образца; P_2 – давление на выходе из образца; ΔS – площадь образца, см^2 ; η – абсолютная вязкость, $\text{г}/(\text{см}^2 \cdot \text{с})$.

В целях моделирования коллоидного капиллярно-пористого тела представим всю его капиллярно-пористую структуру как набор капилляров определенного размера, который, исходя из характеристик проницаемости, может быть выражен через расход.

В уравнении Лапласа определяющим показателем являются главные радиусы кривизны, поэтому для удобства выражения характерного размера форму гипотетического капилляра представим круглой, а его радиус обозначим эффективным радиусом капилляра (4). Из уравнения Пуазейля (2) возможно выразить радиус капилляра (3):

$$Q = \frac{\pi r^4 P}{8 \eta l}; \quad (2)$$

$$r = \sqrt[4]{\frac{8 \eta \Delta Q l}{\pi P}}; \quad (3)$$

где ΔQ – расход флюида, $\text{см}^3/\text{с}$; l – длина образца, см ; P – перепад давления в $\text{г}/\text{см}^2$; η – динамическая вязкость в пузах.

Домножив и разделив подкоренное выражение на ΔS , получим:

$$r_{\text{эф}} = \sqrt[4]{\frac{8}{\pi} \Delta S C}. \quad (4)$$

при $\Delta S = 1 \text{ см}^2$ выражение приобретает вид:

$$r_{\text{эф}} = \sqrt[4]{\frac{8}{\pi} C}, \quad (5)$$

где $r_{\text{эф}}$ – значение эффективного радиуса капилляра в зависимости от коэффициента проницаемости.

Полученное выражение (5) позволяет вычислять эффективный радиус для любого направления фильтрации при известном коэффициенте проницаемости.

Гороховским А. Г. [10] предложена степенная функция зависимости радиуса микрокапилляров от влажности в гигроскопической области. Чтобы использовать данную функцию в качестве коэффициента к эффективному радиусу капилляра, в предлагаемой модели ее необходимо сместить, так как для расчета эффективного радиуса капилляра используются данные при влажности 9 %, а также нормировать, т. е. в нашем случае ограничить диапазон выходных значений интервалом от 0 до 1. Тогда функция приобретет следующий вид (6):

$$k_{\text{эф}}(W) = -8,2 * 10^{-6} * W^4 + 5,537 * 10^{-4} * W^3 - 0,013 * W^2 + 0,159 * W / 0,7278471 / 1,89941692424137, \quad (6)$$

где W – влажность в %; $k_{\text{эф}}$ – коэффициент, учитывающий изменение радиуса микрокапилляров в зависимости от влажности.

Для моделирования капиллярно-пористого тела в *AnsysFluent 2023* применим подход Эйлер-Эйлера [11], который предусматривает взаимопроникновение фаз. Он вводит понятие фазовой объемной доли, которая



является непрерывной функцией, зависящей от пространства и времени. Сумма фазовых объемных долей равна единице. Уравнения сохранения для каждой фазы приводятся к единому виду для решения системы уравнений. Для данного подхода предусмотрена возможность применения подмоделей расчета капиллярного давления, определять которое будем при помощи функции (6).

Для оценки качественных характеристик предложенной модели были произведены оценочные расчеты в среде *PTCMathCADPrime* капиллярного потенциала для древесины сосны при влажности древесины и ее перепаде, соответствующим условиям эксперимента [12]. В расчете (7) использованы эффективный радиус капилляров для направления вдоль волокон, поверхностное натяжение и плотность воды при 20 °С.

$$P_c(W) = \frac{(100-P) \times 2 \times \sigma}{r(W)} ; \quad (7)$$

$$r(W) = r_{\text{эф}} \times k_{\text{эф}}(W);$$

$$P_c(W_1) = 458,355 \text{ Па};$$

$$P_c(W_2) = 292,535 \text{ Па};$$

$$H_1 = \frac{P_c(W_1)}{\rho \times g} = 0,047 \text{ м};$$

$$H_2 = \frac{P_c(W_2)}{\rho \times g} = 0,03 \text{ м};$$

P_c – капиллярное давление при заданной влажности, Па;

P – пористость древесины, %;

σ – поверхностное натяжение воды, Н/м;

$r(W)$ – радиус капилляров в зависимости от влажности с учетом коэффициента эффективности, м;

$r_{\text{эф}}$ – эффективный радиус капилляра, определенный исходя из воздухопроницаемости, м;

$k_{\text{эф}}(W)$ – коэффициент, учитывающий влияние влажности на размеры микрокапилляров;

H_1 – капиллярный потенциал модели древесины сосны при влажности 14 %;

H_2 – капиллярный потенциал модели древесины сосны при влажности 29 %.

Вычисленные значения коррелируют с результатами эксперимента, в котором увлажнение древесины с 14 до 30 % произошло на высоту около 50 мм (рис. 3).

Результаты обработки данных численного моделирования отражены на графике (рис. 4). В качестве начального распределения влажности в образце при инициализации расчета задавалась объемная доля воды, соответствующая 12 %-ной влажности. Из результатов моделирования следует, что при увлажнении изменяются свойства древесины в месте крепления стойки и раскоса на более чем 38,5 % эффективной площади МЗП (т. е. на высоту 40 мм при эффективной высоте МЗП 77,75 мм), а это может привести к значительному снижению несущей способности соединения.

На основании результатов численного моделирования можно сделать вывод о необходимости консервации торцевых поверхностей деревянных элементов стропильных ферм герметизирующими составами на этапе изготовления конструкций. Данная мера, на фоне минимального увеличения себестоимости производства стропильных ферм, приведет к значительному повышению надежности конструкций в случае протечек кровельного покрытия.

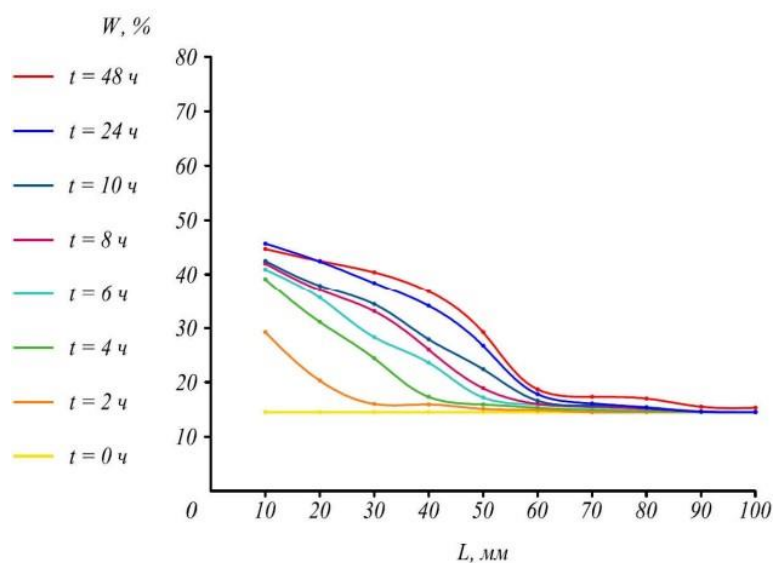


Рис. 3. График распределения влаги в образце по результатам эксперимента

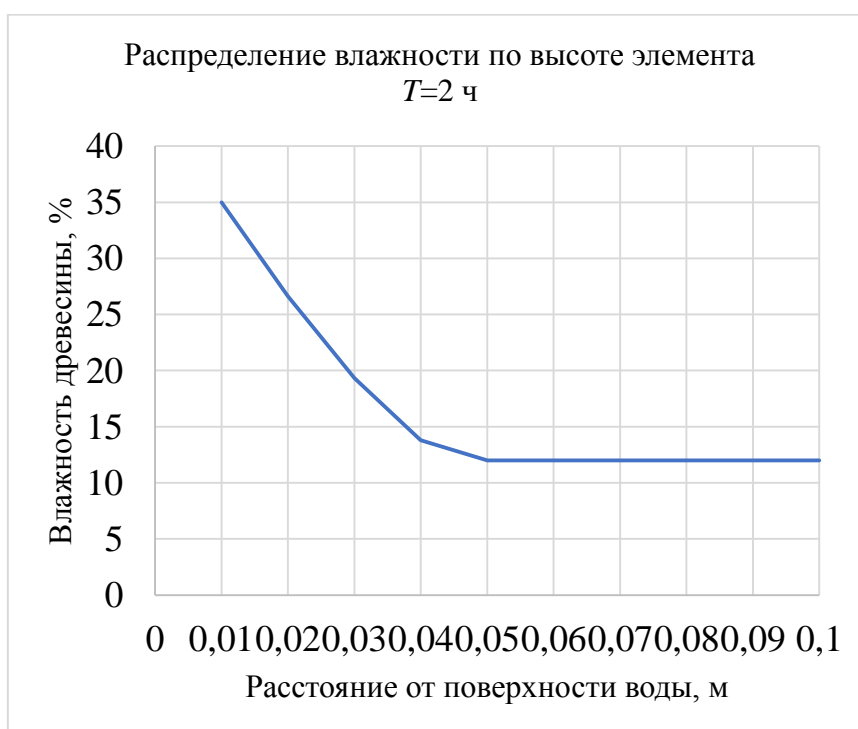


Рис. 4. График распределения влажности в образце по результатам численного моделирования

Сопоставление результатов численного моделирования и экспериментальных данных свидетельствует о возможности применения сформулированной в исследовании модели капиллярного влагопереноса с использованием метода конечных объемов в среде *AnsysFluent 2023R1* для оценки степени увлажнения деревянных элементов строительных конструкций.



БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. ANSI/TPI 1-2022 «National Design Standard for Metal Plate Connected Wood Truss Construction» / The Truss Plate Institute. – 2022.
2. TPIC 2019 «Truss design procedures and specifications for light metal plate connected wood trusses» / Truss Plate Institute of Canada. – 2022. – 98 p.
3. Eurocode 5 : Design of timber structures - Part 1-1 : General - Common rules and rules for buildings. EN 1995-1-1 / European Committee for Standardization. – Brussels, Belgium, 2004.
4. СП 64.13330.2017. Деревянные конструкции : свод правил : издание официальное : утвержден Приказом Министерства строительства и жилищно-коммунального хозяйства Российской Федерации от 27 февраля 2017 г. N 129/пр : актуализированная редакция СНиП II-25-80 : дата введения 28 августа 2017 года. – Москва : Минстрой России, 2017. – 97 с.
5. Лыков, А. В. Явление переноса в капиллярно-пористых телах / А. В. Лыков. – Москва : Гостехиздат, 1954. – 296 с.
6. Niemz, P. Springer Handbook of Wood Science and Technology / Niemz P., Teischinger A., Sandberg D. – Switzerland : Springer Nature Switzerland AG, 2023. – 2063 p.
7. Котлов, В. Г. Процессы тепломассопереноса при напряженно-деформированном состоянии нагельных соединений : специальность 05.02.13 : диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук / Котлов Виталий Геннадьевич ; Ивановский государственный политехнический университет. – Иваново, 2020. – 342 с.
8. Оснач, Н. А. Проницаемость и проводимость древесины / Н. А. Оснач. – Москва : Лесная промышленность, 1964. – 179 с.
9. Wood Handbook. Wood as engineering material / Forest Products laboratory United States Department of Agriculture Forest Service. – Madison, Wisconsin, 2021 – 564 p.
10. Гороховский, А. Г. Технология сушки пиломатериалов на основе моделирования и оптимизации процессов тепломассопереноса в древесине : специальность 05.21.05 : автореферат диссертации на соискание ученой степени доктора технических наук / Гороховский Александр Григорьевич ; Санкт-Петербургская государственная лесотехническая. – Санкт-Петербург, 2008. – 40 с.
11. ANSYS Fluent Theory Guide Release 2021 R1 /ANSYS, Inc. – 2021. – 1070 p.
12. Иванова, М. А. Влияние тепломассопереноса на соединения элементов деревянных стропильных конструкций на металлических зубчатых пластинах при циклически изменяющихся температурно-влажностных параметрах среды эксплуатации : специальность 05.02.13 : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / М. А. Иванова ; Поволжский государственный технологический университет. – Йошкар-Ола, 2020. – 168 с.

SHARYNIN Bogdan Eduardovich, postgraduate student of the chair of building structures and water supplies

NUMERICAL SIMULATION OF MOISTURE DISTRIBUTION IN JOINTS OF WOODEN STRUCTURES ON NAIL PLATES

Volga State University of Technology
3, Lenin Sq., Yoshkar-Ola, 424000, Russia. Tel.: +7 (917) 978-01-28;
e-mail: bogdan.sharynin@yandex.ru

Key words: numerical modeling; joints of wooden structures; nail plates; service conditions; moisture transfer in wood.



The article analyzes the moisture distribution in the heel joint of roof truss with nail plates under extreme humidification using numerical modeling, as well as formulates a model of moisture conductivity of wood, taking into account the limitations of software.

REFERENCES

1. ANSI/TPI 1-2022 «National Design Standard for Metal Plate Connected Wood Truss Construction»/ The Truss Plate Institute// 2022.
2. TPIC 2019 «Truss design procedures and specifications for light metal plate connected wood trusses» / Truss Plate Institute of Canada // 2022 – 98 p.
3. Eurocode 5: Design of timber structures - Part 1-1: General - Common rules and rules for buildings. EN 1995-1-1/European Committee for Standardization// Brussels, Belgium, 2004.
4. SP 64.13330.2017. Derevyannye konstruksii [Wooden structures] : svod pravil : utverzhdyon Prikazom Min-va stroit. i zhilishchno-kommun. khoz-va RF ot 27 fevralya 2017 g. N 129/pr : aktualizir. red. SNiP II-25-80 : data vved. 28 avgusta 2017 goda. – Moscow : Minstroy Rossii, 2017. – 97 p.
5. Lykov A. V. Yavlenie perenosa v kapillyarno-poristykh telakh [The phenomenon of transport in capillary-porous bodies]. – Moscow: Gostekhizdat, 1954. – 296 p.
6. Niemz, P., Teischinger A., Sandberg D. Springer Handbook of Wood Science and Technology. – Switzerland :Springer Nature Switzerland AG, 2023 – 2063 p.
7. Kotlov V. G. Protsessy teplomassoperenosa pri napryazhyonno-deformirovannom sostoyanii nagelnykh soedineniy [Processes of heat and mass transfer in the stress-strain state of nagel joints] : spetsialnost 05.02.13 : diss. ... dok. tekh. nauk ; Ivanov. gos. politekh. un-t. – Ivanovo, 2020. – 342 p.
8. Osnach N. A. Pronitsaemost i provodimost drevesiny [Permeability and conductivity of wood]. Moscow: Lesnaya promyshlennost, 1964. – 179 p.
9. Wood Handbook/ Wood as engineering material / Forest Products laboratory United States Department of Agriculture Forest Service // Madison, Wisconsin, 2021 – 564 p.
10. Gorokhovskiy A. G. Tekhnologiya sushki pilomaterialov na osnove modelirovaniya i optimizatsii protsessov teplomassoperenosa v drevesine [Technology of drying lumber based on modeling and optimization of heat and mass transfer processes in wood] : spetsialnost 05.21.05 : avtoref. diss. ... dok. tekh. nauk ; Sankt-Peterburg. gos. Isotekhnicheskaya. – Saint-Petersburg, 2008. – 40 p.
11. ANSYS Fluent Theory Guide Release 2021 R1 /ANSYS, Inc // 2021. – 1070 p.
12. Ivanova M. A. Vliyanie teplomassoperenosa na soedineniya elementov derevyannykh konstruksiy na metallicheskih zubchatykh plastinakh pri tsiklicheski izmenyayushchikhsya temperaturno-vlazhnostnykh usloviyakh [The influence of heat and mass transfer on the joints of elements of wooden nail plate trusses with cyclically varying temperature and humidity parameters of the operating environment] : spetsialnost 05.02.13 : diss. ... kand. tekh. nauk ; Privolzhsk. gos. tekhnolog. un-t. – Yoshkar-Ola, 2020, 168 p.

© Б. Э. Шарынин, 2024

Получено: 25.03.2024 г.