

**О.А. Куницкая¹, В.Я. Шапиро¹, С.С. Бурмистрова¹, И.В. Григорьев¹,
А.Е. Земцовский²**

¹Санкт-Петербургский государственный лесотехнический университет имени С.М. Кирова

²Северный Арктический федеральный университет имени М.В. Ломоносова

Куницкая Ольга Анатольевна родилась в 1969 г., окончила в 1996 г. С.-Петербургскую государственную лесотехническую академию, кандидат технических наук, доцент кафедры технологии лесозаготовительных производств С.-Петербургского государственного лесотехнического университета. Имеет 35 печатных работ в области лесопромышленного производства.

E-mail: tlzp@inbox.ru



Шапиро Владимир Яковлевич родился в 1955 г., окончил в 1977 г. ТОГУ, доктор технических наук, профессор кафедры высшей математики С.-Петербургского государственного лесотехнического университета. Имеет 45 печатных работ в области лесопромышленного производства.

E-mail: tlzp@inbox.ru



Бурмистрова Светлана Сергеевна родилась в 1973 г., окончила в 2006 г. Высшую школу приватизации и предпринимательства, аспирант кафедры технологии лесозаготовительных производств С.-Петербургского государственного лесотехнического университета. Имеет 5 печатных работ в области лесопромышленного производства.

E-mail: tlzp@inbox.ru



Григорьев Игорь Владиславович родился в 1973 г., окончил в 1996 г. С.-Петербургскую государственную лесотехническую академию, доктор технических наук, профессор кафедры технологии лесозаготовительных производств С.-Петербургского государственного лесотехнического университета. Имеет 135 печатных работ в области лесопромышленного производства

E-mail: silver73@inbox.ru



Земцовский Алексей Екимович родился в 1962 г., окончил в 1985 г. Архангельский лесотехнический институт, доцент кафедры древесиноведения и тепловой обработки древесины Северного (Арктического) федерального университета имени М.В. Ломоносова. Имеет 18 печатных работ в области деревообрабатывающих производств.

E-mail: alz@atnet.ru



ОБОСНОВАНИЕ ИСХОДНЫХ ТРЕБОВАНИЙ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ОБЕЗВОЖИВАНИЯ ДРЕВЕСИНЫ В ПРОЦЕССЕ ПРЕССОВАНИЯ И СУШКИ

С позиций механики деформируемого твердого тела и контактных задач разрушения обоснована необходимость разработки математической модели прессования пропитанной древесины в процессе ее сушки под давлением, в рамках которой воздействие сил сжатия может быть различным по своей природе, а по форме штампа – плоским, цилиндрическим, клиновидным и точечным. Одновременное прессование и сушка требуют учета в математической модели закономерностей деформирования древесины в поле высоких температур на базе фильтрационных особенностей обезвоживания насыщенных влагой образцов, а циклический характер действия сил избыточного давления и обусловленные этим фазы упругого и вязкопластического деформирования образцов, исключаяющих их разрушение, – адекватного соответствия временных характеристик релаксации обезвоживания и напряжений по мере развития процесса прессования и сушки.

Ключевые слова: модификация древесины, пропитка древесины, прессование древесины, математическое моделирование пропитки и прессования древесины.

Основными приемами модифицирования древесины являются обезвоживание, пропитка, прессование и термическая обработка, в том числе и сушка. Наряду с этими приемами древесину

подвергают воздействию ультразвука, электромагнитных полей, радиации и т. д. [1, 6, 8 и др.]. Материалы для пропитки выбирают исходя из поставленных задач: антисептики, антипирены, специальные вещества (например, парафин – для повышения электрических свойств, карбамид – для повышения пластичности, и т. д.).

Обезвоживание удаляет лишнюю влагу, прессование обуславливает увеличение ее плотности и прочности, термообработка закрепляет приобретенные свойства. Максимальный эффект в ходе модифицирования древесины достигается при оптимизации параметров всех указанных процессов и совместной реализации адекватных технологий. Реализация необходимых при этом технологических процессов невозможна без детального изучения структурных особенностей древесины [3], поскольку именно структура влияет на плотность и проницаемость древесины.

Анализ значимости технологических факторов и показателей получения модифицированной древесины [9] (исходная плотность древесины в абсолютно сухом состоянии ρ_0 , конечная плотности ρ , необходимый предел прочности на сжатие $\sigma_{сж}$, исходная влажность W_0 , влажность в процессе увлажнения W , степень прессования C_p , температура древесины T_d , термообработки и сушки T и др.) позволил сделать вывод, что основными (суммарный удельный вес которых в общей оценке значимости результатов достигает 55 %) показателями эффективности процесса модифицирования древесины являются ρ и $\sigma_{сж}$.

Принимая во внимание результаты исследований [4] при изучении свойств коры деревьев в диапазоне изменения $\rho = 300 \dots 700 \text{ кг/м}^3$, установлено, что между показателями ρ и $\sigma_{сж}$ существует тесная корреляционная связь.

Если допустить, что аналогичная связь характерна и для древесины, то можно утверждать, что универсальным преобладающим показателем эффективности модифицирования древесины является ее конечная плотность ρ [9].

В качестве подтверждения данного тезиса на основании обобщения данных [9] для образцов различных пород сухой древесины влажностью не более $W = 5 \%$ в диапазоне изменения их плотности $\rho = 700 \dots 1400 \text{ кг/м}^3$ получена зависимость $\sigma_{сж}$ от ρ , которая с высокой точностью выражается формулой

$$\sigma_{сж} = 116,44 \ln(\rho) - 666,14. \quad (1)$$

Достижение заданной ρ зависит от исходного показателя ρ_0 , который регламентируется плотностью древесного вещества ρ_d и объемной пористостью древесины C_v , % [3]:

$$\rho_0 = \rho_d \left(1 - \frac{C_v}{100} \right), \quad (2)$$

причем ρ_d слабо зависит от породы древесины и изменяется в узком диапазоне $1530 \dots 1540 \text{ кг/м}^3$.

Обобщая данные исследований плотности древесины ρ_0 [5], можно сделать вывод о том, что ρ_0 зависит от диаметра и длины волокон, толщины стенок сосудов, процента поздней древесины, содержания экстрактивных веществ и др. Учесть указанные факторы в совокупности в рамках математической модели с помощью аналитических связей не представляется возможным, в связи с чем было решено использовать средние значения ρ_0 (кг/м^3) для разных пород древесины [3]:

| | |
|------------------|-----|
| Пихта..... | 360 |
| Кедр..... | 420 |
| Ель..... | 430 |
| Осина..... | 430 |
| Сосна..... | 440 |
| Береза..... | 580 |
| Лиственница..... | 560 |
| Ясень..... | 640 |

Увлажнение абсолютно сухой древесины приводит к увеличению плотности, причем рост W до значения $W_r = 30 \%$ повышает количество гигроскопической влаги в древесине, а дальнейшее увеличение W не приводит к росту объема образца древесины. Зависимости плотности влажной древесины ρ от W , ρ_0 и коэффициента объемного разбухания C_p приведены в [3] для двух состояний влажности:

при $W < W_r$

$$\rho = \rho_0 \frac{100 + W}{C_p W + 100};$$

при $W \geq W_r$

$$\rho = \rho_0 \frac{100 + W}{C_p W_r + 100}.$$

(3)

С использованием соотношений (3) на рис. 1 представлен график зависимости относительной величины $K_W = \rho/\rho_0$ от W и C_p .

Как видно из рис. 1, совокупное влияние параметров W и C_p даже в относительно небольшом диапазоне изменения их значений приводит к достаточно существенному (до 30 %) увеличению плотности древесины по сравнению с показателями в абсолютно сухом состоянии. Влияние

увлажнения на предел прочности на сжатие $\sigma_{сж}$ древесины абсолютно иное.

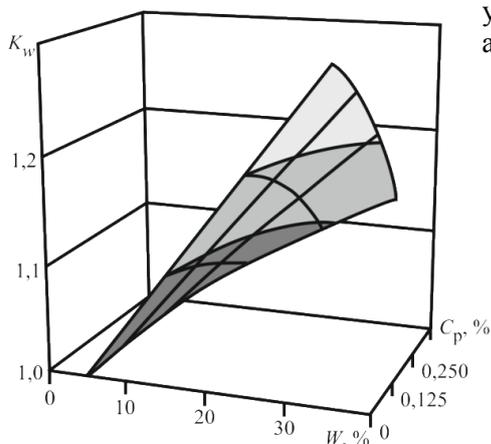


Рис. 1. Влияние влажности W и коэффициента объемного разбухания C_p на относительное изменение плотности

влажной древесины $K_W = \rho/\rho_0$

Так, на процесс снижения прочности древесины с ростом влажности в диапазоне изменения $W \leq W_T$ влияет только связанная влага, содержащаяся в клеточных оболочках, причем на 1 % роста W показатель $\sigma_{сж}$ снижается на 2 %.

На рис. 2 при фиксированном значении $C_p = 0,25$ отражены результаты исследования влияния влажности на предел прочности на сжатие древесины для трех значений объемной пористости C_v . Как видно из данных рис. 2, угловой коэффициент в полученных линейных зависимостях, характеризующий интенсивность снижения $\sigma_{сж}$ с ростом W , уменьшается в 2 раза (от $-1,5770$ до $-0,7882$) при увеличении C_v в 5 раз (от 10 до 50 %). Таким образом, для оценки прочности образцов древесины на сжатие можно использовать функцию двух переменных:

$$\sigma_{сж} = (0,0197C_v - 1,7933)W - 1,7748C_v + 204,43. \quad (4)$$

Для повышения пластических свойств древесины широкое применение получили растворы карбамида. Закономерности изменения анатомического строения натуральной и пропитанной раствором карбамида древесины в процессе ее прессования и сушки в различных направлениях подробно изучены в [9], где подчеркивается, что, во-первых, деформационные свойства древесины значительно увеличиваются при прессовании поперек волокон, во-вторых, сама по себе пропитка не приводит к улучшению свойств древесины, а нужный эффект достигается при дальнейшем обезвоживании образцов со снижением влажности от 50 до 2 ... 3 %, причем сушку под давлением осуществляют в циклическом режиме, повышая температуру до 120 ... 140 °С, а давление до 0,7 ... 1,5 МПа. Достижение заданных показателей прессования в 30 ... 50 % случаев происходит в течение 15 ... 20 ч.

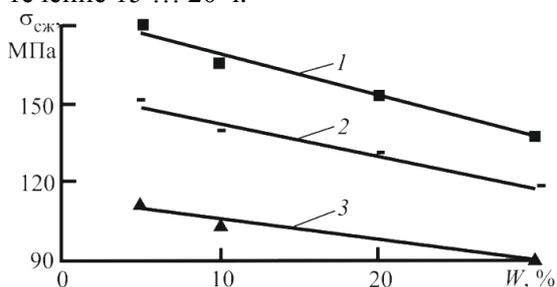


Рис. 2. Зависимость предела прочности на сжатие $\sigma_{сж}$ древесины от ее влажности W при $C_p = 0,25$ и разной объемной пористости: 1 – 10 % ($y = -1,577x + 184,97$; $R^2 = 0,9761$); 2 – 30 % ($y = -1,2398x + 154,62$; $R^2 = 0,9749$); 3 – 50 % ($y = -0,7882x + 112,08$; $R^2 = 0,9711$)

Циклический характер прессования обуславливает необходимость учета реологических свойств и моделей среды – диаграмм «напряжение–деформация», кривых ползучести, времени релаксации и т.д. Влажность W влияет на все указанные характеристики среды. При этом наличие карбамида ускоряет сорбцию влаги и показатели W обработанной древесины устойчивее и выше, чем аналогичные показатели для натуральной древесины, что важно учитывать в моделях среды при изучении процесса сушки и термообработки.

Наряду с механическими деформациями древесины под давлением в поле высоких температур имеют место и температурные деформации, которые зависят от направления

деформирования и коэффициента линейного расширения α древесины, характеризующего увеличение единицы длины материала при нагревании на 1°C.

В табл. 1 приведены значения коэффициента линейного расширения древесины поперек волокон в радиальном и тангенциальном направлениях для трех пород древесины [10].

Таблица 1

| Порода | Коэффициент линейного расширения поперек волокон $\alpha \cdot 10^{-6}$, град ⁻¹ , в направлении | |
|--------|---|----------------|
| | радиальном | тангенциальном |
| Береза | 27,9 | 33,7 |
| Сосна | 29,7 | 31,3 |
| Осина | 26,0 | 35,9 |

Как следует из данных табл. 2, для различных пород древесины наблюдается устойчивость значений коэффициента α в различных направлениях поперек волокон. Вдоль волокон аналогичные показатели в 7–10 раз меньше данных табл. 2, т. е. температурный фактор является более существенным при реализации прессования образцов древесины поперек волокон.

Оценить температурные деформации ε_T и обусловленное этим давление P_T в клетках древесины можно, базируясь на основных положениях так называемых температурных задач механики разрушения [2]. В частности, если внутренние элементы материала не имеют возможности свободно деформироваться, то могут возникать большие внутренние напряжения, приводящие к разрушению образца, а температурные деформации пропорциональны величине αT . Таким образом, тепловой поток обуславливает дополнительное температурное давление P_T внутри элементов материала и соответствующие температурные деформации ε_T :

$$P_T = \frac{\alpha E T}{2(1-\nu)}; \quad \varepsilon_T = \frac{P_T}{E}, \quad (5)$$

где E – модуль Юнга;

ν – коэффициент Пуассона.

В частности, при исходных данных для образцов влажной березы ($\alpha = 33,7 \cdot 10^{-6}$ град⁻¹, $W = 50$ %, $\rho = 760$ кг/м³, $E = 138$ МПа, $\nu = 0,3$ и $T = 140$ °С) с использованием (5) получено температурное давление $P_T = 0,47$ МПа, которое существенно влияет на процесс прессования древесины.

Очевидно, что характер и закономерности деформирования образцов зависят от способа создания избыточного давления P в определенном температурном поле T , а также от формы и размеров штампа в процессе его воздействия на массив древесины.

Наибольшее распространение получили технологии прессования под плоским прессом (штампом), когда площадь контактной поверхности штампа превосходит или в точности совпадает с площадью образца. В том случае, когда прессование шарообразных образцов осуществляется с помощью плоского пресса, в начальный момент времени имеет место точечный контакт, который по мере развития процесса деформирования древесины трансформируется в плоский случай. В направлении силы сжатия прессование обеспечивает уменьшение диаметра образцов в 2–2,5 раза (например, при производстве шпал – от 250 мм до 100 мм).

Существует технология прессования, когда штамп в виде пуансона давит на плоский клин. Этот случай также можно отнести к технологиям точечного контакта, но при этом давление действует не на всю площадь образца, а является пространственно-переменной величиной при постоянных геометрических параметрах контакта. Отмечается [9], что при данной технологии прессования снижается интенсивность процесса разрушения, представляется возможным повысить скорость прессования V_{II} образца, его плотность и прочность.

Перспективным, по мнению [3], является случай, когда ширина образца древесины меньше ширины пресса, имеющего искривленный профиль в виде валков, движущихся с заданной скоростью V_B . При таком способе прессования углубление валков на h при начальной высоте образца H вызывает в направлении действия силы сжатия вертикальные деформации $\varepsilon = h/H$, а вертикальное давление для упругого тела

$$q_B = E\varepsilon. \quad (6)$$

Насыщенная влагой древесина рассматривается как упругое фильтрационное тело, а скорость истечения жидкости $V_{ж}$ по мере сжатия валков затухает во времени по экспоненциальной кривой и в соответствии с законом Дарси зависит от следующих параметров: удельного объема порового

пространства C_u в объеме древесины, занятого жидкостью; коэффициента проницаемости k_n среды (площади сечения канала s_k пористой среды, в которой происходит фильтрация жидкости); динамической вязкости γ жидкости; скорости прессования V_n (погружения штампа в древесину); ширины b и высоты H образца; высоты погружения штампа h ; q_b и E . В результате выполненных исследований установлены формулы для определения $V_{ж}$ и времени релаксации обезвоживания t_o при истечении жидкости в пределах слоя h :

$$V_{ж} = \frac{C_u V_n}{2(H-h)} \exp\left(- (q_b + E) \frac{4k_n t}{\gamma C_u b^2}\right); \quad (7)$$

$$t_o = \gamma \frac{C_u V_n b^2}{4k_n (q_b + E)}. \quad (8)$$

Из анализа (7) и (8) видно, что влияние температуры термообработки и сушки не учитывается при определении как скорости истечения жидкости, так и времени релаксации обезвоживания, хотя ранее произведенные оценки влияния T на температурные деформации свидетельствуют о том, что при расчете параметров $V_{ж}$ и t_o такой учет необходим. В подтверждение этого отметим, что фактор температуры оказывает существенное влияние и на динамическую вязкость жидкости, в частности воды. Повышение T от комнатной (20 °С) до температуры кипения (100 °С) обуславливает снижение динамической вязкости в 2,5–3 раза, причем этот параметр в силу (8) является линейным коэффициентом при определении времени обезвоживания древесины t_o .

Одним из основных параметров процесса прессования служит q_b , определяемая в соответствии с (6) и учитываемая в (7) и (8). Однако параметры штампа в данной формуле не находят своего отражения. Более точно можно оценить давление q_b , если учесть результаты исследований [10] при вдавлении штампа в различные материалы:

$$q_b = \frac{Eh}{R \arctg\left(\frac{H-h}{R}\right)}, \quad (9)$$

где R – параметр штампа, $R = \frac{2b\left(1 + \frac{b}{H}\right)}{\sqrt{\pi}}$.

Сравним результаты оценки q_b при использовании формул (6) и (9).

На рис. 3 представлен график, характеризующий зависимость степени превышения (Δ) значений давлений прессования q_b , вычисленных по формуле (9), по сравнению с традиционной формулой (6), от отношения b/H . Как видно из данных рис. 3, уже при $b/H < 0,9$ степень превышения Δq_b составляет более 10 %, т. е. расчеты по формуле (9) представляются более обоснованными и точными.

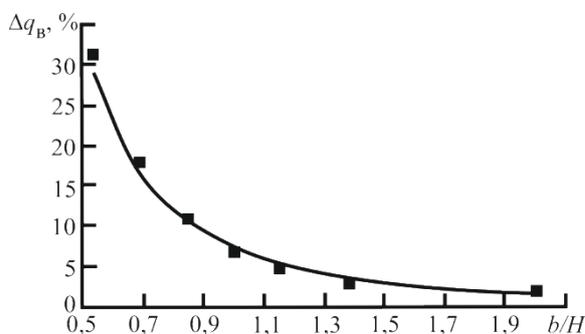


Рис. 3. Зависимость превышения давления Δq_b от формы (b/H) штампа ($y = 7,4749x^{-2,2043}$; $R = 0,9842$)

Таблица 2

| Порода | Модуль Юнга, МПа | | |
|--------|------------------|-------|-------|
| | E_b | E_r | E_t |
| Сосна | 11 700 | 20 | 500 |
| Ель | 14 200 | 590 | 360 |

| | | | |
|--------|--------|-------|-----|
| Дуб | 14 000 | 1 290 | 910 |
| Береза | 15 800 | 600 | 450 |

При определении параметров напряженно-деформированного состояния материала, оценке его реологических свойств и времени релаксации необходима информация о модуле Юнга – одной из основных характеристик процесса упругопластического прессования древесины. Результаты исследований [9] свидетельствуют о том, что E зависит от направления прессования, влажности, плотности материала и температуры T . Учет влияния всех перечисленных факторов в рамках одной аналитической формулы представляется неразрешимой задачей, о чем свидетельствуют и выводы [9], когда расхождение опытных данных с теоретическими оценками достигает 3–8 раз.

В табл. 2 при влажности различных пород древесины $W = 15\%$ представлены значения модуля Юнга вдоль (E_v) и поперек волокон в радиальном (E_r) и тангенциальном (E_t) направлениях [7]. При росте (снижении) влажности на 1 % модуль Юнга необходимо уменьшать (увеличивать) на 2 %. Плотность древесины при заданном W уточняется по формулам (3).

Данные табл. 2 свидетельствуют о существенной анизотропии упругих свойств древесины.

При обезвоживании древесины широкое применение получил автоклавный способ создания избыточного давления, когда древесина испытывает объемное сжатие. При автоклавной технологии достигается избыточное давление в 1,5 ... 2,0 МПа, сушка производится при температуре 140 ... 150 °С в течение 12...13 ч. В этом случае удается высушивать древесину, снижая ее влажность от 70 ... 80 до 3 ... 5 %.

Известна также технология прессования без использования пресс-форм. В этом случае рекомендуется циклическое уплотнение образцов с такой скоростью прессования V_n , при которой в заданном температурном поле T поперечная деформация

$$\mu\varepsilon = \frac{\nu}{(1-\nu)} \varepsilon$$

(где μ – коэффициент бокового распора) в течение всего периода времени сушки не превышала бы деформацию усушки ε_y в направлении, перпендикулярном направлению действия сжимающей нагрузки. Деформация ε_y зависит от коэффициента усушки древесины K_y и степени снижения влажности \bar{W} :

$$\varepsilon_y = K_y \bar{W}. \quad (10)$$

Анализ коэффициента K_y усушки ряда образцов древесины поперек волокон в радиальном и тангенциальном направлениях показал, что K_y изменяется в широком диапазоне значений, причем усушка в тангенциальном направлении для хвойных пород древесины в среднем в 1,7–1,8 раза превосходит усушку в радиальном направлении, тогда как для лиственных пород снижается до 1,2–1,6. Таким образом, прессование древесины целесообразно производить в направлении минимальной усушки. Если для березы этот фактор можно считать малозначимым, то для других пород – существенным.

Целью всех перечисленных способов прессования древесины является обеспечение таких параметров процесса, при которых достигается получение образца с заданной плотностью и прочностью без образования трещин и дефектов.

Таким образом, с позиций механики деформируемого твердого тела и контактных задач разрушения необходимо разработать математическую модель прессования пропитанной древесины в процессе ее сушки под давлением, в рамках которой воздействие сил сжатия может быть различным по своей природе (одномерным, двумерным и объемным) и форме штампа (плоским, цилиндрическим, клиновидным и точечным). Одновременное прессование и сушка требуют учета в математической модели закономерностей деформирования древесины в поле высоких температур на базе фильтрационных особенностей обезвоживания насыщенных влагой образцов, а циклический характер действия сил избыточного давления и обусловленные этим фазы упругого и вязкопластического деформирования образцов, исключаящих их разрушение, – адекватного соответствия временных характеристик релаксации обезвоживания и напряжений по мере развития процесса прессования и сушки различных пород древесины.

По сути перечисленные требования являются исходными данными при разработке математической модели прессования и сушки пропитанной древесины.

1. *Винник Н.И.* Модифицированная древесины. М.: Лесн. пром-сть, 1980. 159 с.
2. *Партон В.З.* Механика разрушения: от теории к практике. Изд. 3-е. М.: Изд-во ЛКИ, 2010. 240 с.
3. *Патякин В.И., Тишкин Ю.Г., Базаров С.М.* Техническая гидродинамика древесины. М.: Лесн. пром-сть, 1990. 304 с.
4. Повышение эффективности механической окорки лесоматериалов / А.М. Газизов [и др.]. СПб.: СПбГЛТА, 2009. 239 с.
5. *Полубояринов О.И.* Плотность древесины. М.: Лесн. пром-сть, 1976. 160 с.
6. *Серговский П.С.* Гидротермическая обработка и консервирование древесины. М.: Лесн. пром-сть, 1975. 400 с.
7. *Уголев Б.Н.* Древесиноведение и лесное товароведение: учеб. Изд. 2-е. М.: Академия, 2006. 272 с.
8. *Хухрянский П.Н.* Прессование древесины. М.: Лесн. пром-сть, 1964. 351 с.
9. *Шамаев В.А.* Физико-механическое модифицирование древесины. Воронеж: Изд-во ВГЛТА, 2003. 260 с.
10. *Шапиро В.Я., Григорьев И.В., Жукова А.И.* Влияние сдвиговых деформаций на процесс циклического уплотнения почвы // Естеств. и техн. науки. 2006. № 1. С. 174–180.

Поступила 06.12.11

O.A. Kunitskaya¹, V.Y. Shapiro¹, S.S. Burmistrova¹, I.V. Grigoriev¹, A.E. Zemtsovskiy²

¹Saint-Petersburg State Forestry University

²Northern (Arctic) Federal University named after M.V. Lomonosov

Argumentation of Mathematic Model Initial Conditions for Dehydrating of Wood During Compression and Drying Process

In paper, from positions of mechanics of a strained solid and contact problems of destruction necessity of development of mathematical model of pressing of an impregnated wood during its drying under pressure, within the limits of which is proved: affecting of forces of compression can be various by the nature and under the form of the press tool - flat, cylindrical, wedge-shaped and dot. Simultaneous pressing and drying demand the account in mathematical model of regularity of a straining of wood in a floor of heats on the basis of filtrational habits of dehydration of moisture-laden specimens; cyclic character of act of forces of a gauge pressure and the phases of an elastic and viscous and plastic straining of the specimens expelling their destruction caused by it, demand adequate conformity of time responses of a relaxation of dehydration and pressure in process of evolution of process of pressing and drying.

Keywords: modification of wood, wood impregnation, wood compression, mathematic modeling of wood impregnation and compression.
