

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

2024, Том 16, № 3 / 2024, Vol. 16, Iss. 3 <https://esj.today/issue-3-2024.html>

URL статьи: <https://esj.today/PDF/77SAVN324.pdf>

DOI: 10.15862/77SAVN324 (<https://doi.org/10.15862/77SAVN324>)

2.1.1. Строительные конструкции, здания и сооружения (технические науки)

2.1.5. Строительные материалы и изделия (технические науки)

Ссылка для цитирования этой статьи:

Москалев, М. Б. Зависимость влажности древесины в процессе эксплуатации от условий среды /

М. Б. Москалев, Д. Г. Чарник // Вестник евразийской науки. — 2024. — Т. 16. — № 3. — URL:

<https://esj.today/PDF/77SAVN324.pdf> DOI: 10.15862/77SAVN324

For citation:

Moskalev M.B., Charnik D.G. Dependence of wood moisture in the process of operation on environmental conditions.

The Eurasian Scientific Journal. 2024;16(3): 77SAVN324. Available at: <https://esj.today/PDF/77SAVN324.pdf>. (In Russ., abstract in Eng.) DOI: 10.15862/77SAVN324

УДК 694.141.2

Москалев Михаил Борисович

ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет»,

Санкт-Петербург, Россия

Доцент кафедры «МиДК»

Кандидат технических наук, доцент

E-mail: cosccc@gmail.com

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7810-6484>

РИНЦ: https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=821085

Чарник Дмитрий Геннадьевич

ФГБОУ ВО «Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I»,

Санкт-Петербург, Россия

Старший преподаватель

E-mail: charnik_dmitriy@mail.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7170-6105>

Зависимость влажности древесины в процессе эксплуатации от условий среды

Аннотация. Автором представлен анализ основных зависимостей влажности в древесных материалах в процессе эксплуатации. В статье рассмотрены физические процессы, проходящие при сушке/увлажнении древесины, и виды влаги в древесине. В статье рассмотрена зависимость равновесной влажности древесины от влажности среды. Данная зависимость отражена с помощью графиков. Следует отметить, что равновесная влажность при сушке и увлажнении древесины отличается на гистерезис увлажнения. Как рассмотрено в статье, при изменении влажности среды, влажность в пиломатериалах также меняется с определенной задержкой. Данная задержка выражена уравнением зависимости времени от начальной и конечной влажности древесины и влажности среды, а также геометрии рассматриваемого пиломатериала. Для вывода данной зависимости за основу взято дифференциальное уравнение влагосодержания в древесине и в дальнейшем в статье показан поэтапный вывод зависимости времени от изменения содержания влаги в древесине. В статье также рассмотрены предпосылки, при которых выведена данная зависимость: это влажность ниже точки насыщения, регулярный режим сушки, который является часто встречающимся и равномерное начально распределение, отсутствие влияние изменения температуры на

влажностепроводность при малых градиентах температуры, отсутствие переноса влаги под действием внутреннего избыточного давления. Следует отметить, что данная зависимость при сушке и увлажнении отличается незначительно и данные отличия также рассмотрены в статье.

Ключевые слова: влажность; влаготепроводность; эксплуатация деревянных конструкций; влагосодержание; деревянные конструкции; градиент влажности; градиент температуры

Введение

Влажность древесины в процессе эксплуатации претерпевает значительные изменения. Сначала ее влажность сильно падает от естественной влажности, до влажности в пределах 12–15 %. В дальнейшем ее влажность следует за изменением влажности среды со значительной задержкой. Установившаяся равновесная [1] влажность при увлажнении и сушке древесины различается на величину ΔW (рис. 1). Таким образом, равновесная влажность находится в диапазоне шириной ΔW . Величина ΔW зависит от размера пиломатериала для большей части пиломатериалов, за исключением мелкогазмерного шпона $\Delta W = 2,5 \%$.

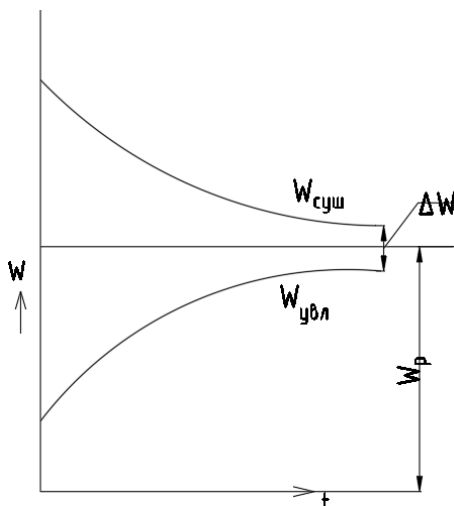


Рисунок 1. Равновесная влажность при сушке и увлажнении древесины [2]

Диаграмма зависимости равновесной влажности от температуры и влажности среды при сушке древесины была получена Н.Н. Чулицким и уточнена П.С. Серговым (рис. 2).

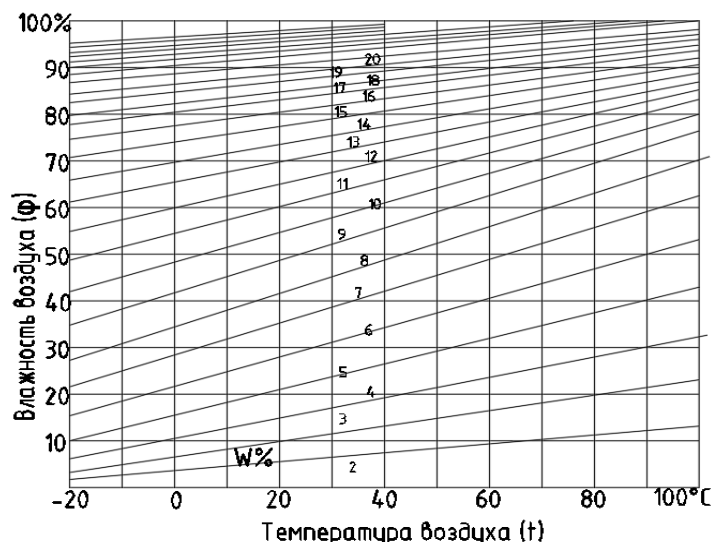


Рисунок 2. Диаграмма зависимости равновесной влажности от условий среды [3]

По этой диаграмме равновесная влажность древесины [4] (изолинии в середине рисунка, и проценты поставленные над ними) зависит от температуры и влажности воздуха одновременно [5]. На практике пиломатериалы поступают на строительную площадку с влажностью от 18 до 25 %.

Большое значение в процессе увлажнения/сушки древесины играет точка насыщения волокон. При влажности выше точки насыщения волокон в клеточных полостях находится вода в жидкой фазе, при влажности ниже точки насыщения вода в клеточных полостях находится только в виде пара. При влажности выше точки насыщения, вода по клеточным полостям может передвигаться в жидкой фазе, при влажности ниже точки насыщения, вода по древесине передвигается как в жидкой фазе, так и в виде пара.

Для большинства пород точка соответствует влажности $W = 27\text{--}30\%$. Как мы видим из диаграммы Н.Н. Чулицкого, в процессе эксплуатации точка насыщения волокон для строительных конструкций практически не достижима, поэтому все деревянные конструкции при эксплуатации имеют влажность ниже точки насыщения.

Древесина самых распространенных в строительстве хвойных пород состоит в основном из удлиненных клеток-трахеид. Полости смежных трахеид соединяются между собой окаймленными порами. Помимо трахеид, древесина хвойных пород включает в себя сердцевинные лучи и смоляные ходы. Однако вследствие их относительно малого объема эти элементы заметного влияния на влагопроводность древесины не оказывают.

Влага в древесине может двигаться как вдоль, так и поперек волокон. Поскольку известно, что процесс сушки и увлажнения древесины на практике определяется почти исключительно влагопроводностью древесины поперек волокон, мы остановимся на рассмотрении характера движения влаги только в этом направлении.

Древесина при влажности ниже точки насыщения волокна [6] не содержит свободной влаги. Все полости клеток в этом случае заполнены воздухом. Если в результате испарения влаги с поверхности в древесине образуется градиент влажности, это обуславливает появление в ней соответствующего градиента парциального давления водяного пара. Под влиянием этого градиента водяной пар начинает диффундировать [7] по направлению к поверхности по полостям клеток через полости окаймленных пор и через отверстия в их мембранах. При своем переходе из одной полости клетки в смежную, водяной пар преодолевает последовательно следующие сопротивления: сопротивление полости клетки, сопротивление полостей окаймленных пор и сопротивление отверстий в мембранах пор. Вследствие того, что относительная площадь поперечного сечения отверстий в мембранах пор во много раз меньше площади сечения полостей окаймленных пор и самих клеток, общее сопротивление диффузии водяного пара в древесине определяется размерами и числом отверстий в мембранах пор. В такой древесине, где отверстия в мембранах пор очень малы или где они закупорены, продвижение влаги в виде пара сильно замедляется.

При влажности в древесине ниже точки насыщения волокна кроме движения пара в древесине происходит движение гигроскопической влаги по межмицеллярным каналам под действием капиллярных сил [8]. Капиллярное натяжение, как известно, увеличивается с уменьшением диаметра капилляра. На поверхности древесины, где прослойка между мицеллами тоньше, чем внутри, оно будет больше. Разности этих натяжений и заставляет связанную влагу передвигаться из зоны с большей влажностью в зону с меньшей влажностью. Межмицеллярные промежутки, сообщающиеся между собой и пронизывающие в различных направлениях всю субстанцию клеточных стенок, могут условно рассматриваться как ряд параллельных капилляров, некоторые из которых идут непрерывно по всей толщине древесины, другие же имеют протяженность, равную толщине межклеточной стенке или даже

толщине мембраны. Первые проводят влагу по всей толщине древесины, вторые же лишь из одной полости клетки в смежную. В последнем случае по самой полости клетки влага передвигается в виде пара, испаряясь на одной стороне внутренней поверхности клетки и конденсируясь на противоположной.

Таким образом, влага в древесине при влажности ниже точки насыщения волокна движется параллельно в виде пара и в виде жидкости по следующим трем группам влагопроводящих путей:

1. В виде жидкости — по длинным (непрерывным) межмицеллярным капиллярам.
2. В виде пара — по заполненным воздухом капиллярным каналам, состоящим из последовательных рядов клеточных полостей и пор, перегороденных мембранами.
3. В виде пара и жидкости, последовательно переходя из одного агрегатного состояния в другое по коротким межмицеллярным капиллярам и полостям клеток.

Суммарный количественный эффект, создаваемый всеми этими влагопроводящими путями, оценивается коэффициентом влагопроводности [9].

Основные положения теории переноса влаги внутри древесины

Существуют два подхода изучения переноса влаги внутри древесины [10; 11]:

- На основании микромеханизма процесса. Это представляет интерес с точки зрения изучения физико-механических процессов переноса, однако математическое описание процесса будет крайне сложным и на практике редко применяется.
- На основании макромеханизма процесса. Тут рассматривается феноменологическая картина, основанная как правило на базе термодинамических соотношений. Рассмотрим данный подход более подробно.

При выводе дифференциального уравнения переноса влаги необходимо знать источники вещества, т. е. соответственно массу испарившейся и сконденсированной влаги, а при выводе дифференциального уравнения переноса тепла — источники тепла, т. е. соответственно расходы на испарение и выделение тепла при конденсации.

Учет источников влаги и тепла может быть выполнен по-разному.¹ Одним из методов их учета является введение критерия фазового превращения ε , под которым понимают отношение изменения влагосодержания за счет фазового превращения dU_{ϕ} (испарение — конденсация) к общему изменению влагосодержания dU :

$$\varepsilon = \frac{dU_{\phi}}{dU}. \quad (1)$$

При $\varepsilon = 0$ фазовые превращения отсутствуют, влагосодержание изменяется только за счет переноса жидкости. При $\varepsilon = 1$ влагосодержание изменяется только за счет испарения жидкости, перенос которой отсутствует.

Количество влаги в единице объема при фазовых превращениях

$$\varepsilon \rho_0 \frac{dU}{d\tau}, \quad (2)$$

¹ Лыков А.В. Тепло- и массообмен в процессах сушки. / А.В. Лыков // Москва; Ленинград: Госэнергоиздат, 1956. — 464 с.

где $\frac{\partial U}{\partial \tau}$ — скорость изменения влагосодержания (τ — время); ρ_0 — плотность абсолютно сухого тела.

Источник тепла:

$$r_0 \varepsilon \rho_0 \frac{dU}{d\tau}, \quad (3)$$

где r_0 — теплота фазового перехода.

Если учесть, что влагосодержание связано с потенциалом переноса влаги соотношением:

$$\partial \Theta = \frac{\partial U}{c'_\Theta}. \quad (4)$$

В котором C'_Θ — удельная влагоемкость, являющаяся аналогом удельной теплоемкости и показывающая количество влаги, которое необходимо сообщить телу, чтобы поднять его потенциал на одну единицу, система уравнений переноса тепла и влаги будет иметь вид [12]:

$$\frac{\partial t}{\partial \tau} = a \nabla^2 t + r_0 \varepsilon \frac{c'_\Theta}{c} \frac{\partial \theta}{\partial \tau}; \quad (5)$$

$$\frac{\partial \theta}{\partial \tau} = a \nabla^2 \theta + a' \delta' \nabla^2 t. \quad (6)$$

При наличии внутреннего избыточного давления p система усложняется:

$$\frac{\partial t}{\partial \tau} = a \nabla^2 t + r_0 \varepsilon \frac{c'_\Theta}{c} \frac{\partial \theta}{\partial \tau} + \frac{C_p K}{c \rho_0} \nabla p \nabla t; \quad (7)$$

$$\frac{\partial \theta}{\partial \tau} = a \nabla^2 \theta + a' \delta' \nabla^2 t + a' \delta' \nabla^2 p; \quad (8)$$

$$\frac{\partial p}{\partial \tau} = a'_p \nabla^2 p - \varepsilon \frac{c'_\Theta}{c'_B} \frac{\partial \theta}{\partial \tau}. \quad (9)$$

Здесь a — коэффициент температуропроводности; C и C_p — удельная теплоемкость тела и парогазовой смеси; K — коэффициент воздухопроницаемости тела; a' — коэффициент потенциалопроводности молекулярного и капиллярного переноса влаги; δ'_p — отношение коэффициентов влагопереноса λ'_p/λ' ; a'_p — коэффициент потенциалопроводности молярного переноса пара:

$$a'_p = \frac{K}{c'_B \rho_0}, \quad (10)$$

где C'_B — удельная влагоемкость тела по отношению к влажному воздуху в процессе молярного движения парогазовой смеси.

Использование дифференциальных уравнений переноса возможно лишь при наличии сформулированных краевых условий: начальных, характеризующих распределение потенциалов переноса (например, температуры) при $\tau = 0$, и граничных, отображающих закон взаимодействия поверхности тела с окружающей средой.

Для конвективной сушки/увлажнения в общем случае применительно к системе уравнений (5–9) граничные условия можно записать:

$$\alpha(t_c - t_n) - \lambda(\nabla t)_n - (1 - \varepsilon)r_0 \alpha'_\Theta(\Theta_n - \Theta_p) = 0; \quad (11)$$

$$\alpha'_\Theta(\Theta_n - \Theta_p) + \lambda'(\nabla \Theta)_n + \lambda' \delta'(\nabla t)_n + \lambda_p(\nabla p)_n = 0; \quad (12)$$

$$p_n = p = const. \quad (13)$$

В этих выражениях индекс p обозначает поверхность. Первый член граничного условия для переноса тепла (11) определяет количество тепла, подведенного к поверхности тела (t_c — температура среды; α — коэффициент теплообмена), второй член — количество тепла, отведенного от поверхности внутрь тела, третий член — затраты тепла на испарение влаги на поверхности (α'_Θ — коэффициент массообмена между средой и поверхностью, отнесенной к разности потенциалов переноса влаги на поверхности Θ_n и равновесного потенциала массопереноса в среде Θ_p). При $\varepsilon = 1$ (испарение происходит только внутри тела) этот член уравнения (11) равен 0, при $\varepsilon = 0$ он максимален, так как вся влага в жидком виде подводится к поверхности.

Первый член граничного условия для переноса влаги (12) характеризует поток влаги, удаляемый с поверхности в окружающую среду, второй, третий и четвертый члены — количество влаги, подводимое к поверхности соответственно под действием градиентов потенциала переноса влаги $\nabla\Theta$, температуры ∇t и избыточного давления ∇p .

Когда градиент влагосодержания может рассматриваться как потенциал переноса влаги к древесине это относится для зон, в которых $U < U_{п.г.}$ ($W < W_{п.г.}$) — дифференциальные уравнения переноса и условия однозначности (при $\nabla p = 0$) примут вид [12]:

$$\frac{\partial t}{\partial \tau} = a \nabla^2 t + \frac{r_0 \varepsilon}{c} \frac{\partial U}{\partial \tau}; \quad (14)$$

$$\frac{\partial U}{\partial \tau} = a \nabla^2 U + a' \delta \nabla^2 t; \quad (15)$$

граничные условия:

$$\alpha(t_c - t_n) - \lambda(\nabla t)_n - (1 - \varepsilon)r_0\alpha'_\Theta\rho_0(U_n - U_p) = 0; \quad (16)$$

$$\alpha'_U(U_n - U_p) + \alpha'\rho_0(\nabla U)_n + \alpha'\rho_0\delta(\nabla t)_n = 0. \quad (17)$$

Здесь α'_U — коэффициент влагообмена, отнесенный к разности влагосодержания на поверхности U_n и равновесного влагосодержания в среде U_p ; δ — относительный коэффициент термодиффузии (размерность 1/град), равный отношению термодиффузии a' к коэффициенту теплопроводности a при записи закона переноса влаги в виде:

$$q' = -a'\rho_0\nabla U - a'_t\rho_0\nabla t = -a'\rho_0(\nabla U + \delta\nabla t). \quad (18)$$

В дальнейшем анализе используются следующие критерии подобия, которые получаются из системы дифференциальных уравнений переноса (7–9) и условий однозначности (11–13):

1. Критерий гомохронности Фурье, характеризующий масштаб времени:

$$Fo = \frac{a'\tau}{R^2}. \quad (19)$$

2. Критерий Кирпичева и его аналог — критерий Био, учитывающие соотношение между интенсивностью внешнего и внутреннего переноса:

$$Ki' = \frac{q'R}{a'\rho_0\Delta U} \quad (20)$$

и

$$Bi' = \frac{a'}{a}R. \quad (21)$$

Данные критерии связаны между собой зависимостями:

$$Ki' = Bi \frac{t_c - t_n}{\Delta t} \quad (22)$$

и

$$Ki' = Bi' \frac{U_n - U_p}{\Delta U}. \quad (23)$$

Вывод уравнения зависимости влажности древесины от времени и параметров среды

Сушка представляет собой сложный нестационарный процесс, в котором взаимосвязаны различные физические явления. Они относятся к категории процессов тепло- и массообмена, которые, несмотря на свою сложность, имеют общую теорию, основанную на термодинамике необратимых процессов. В эту феноменологическую теорию, представляющую собой обобщение известных законов природы, естественно вписываются и процессы сушки. Как показывает анализ этой теории, подтвержденной экспериментами, процесс сушки материалов определяется в общем случае внутренним и внешним переносом влаги и тепла. Взаимообусловленность этих явлений приводит к тому, что перенос влаги видоизменяет поле температуры в теле, а перенос тепла влияет на перераспределение влаги, в связи с чем в общем случае требуется их совместный учет. Это означает, что решение вопроса о температурно-влажностном поле в процессе сушки должно в общем случае базироваться на решении всей системы дифференциальных уравнений и краевых условий, сформулированных выше.

Для практических расчетов применение этих чрезвычайно сложных решения избыточно. Реальные процессы сушки в широких пределах переменных факторов определяются меньшим количеством связей, чем заложено в общей системе уравнений, или роль части связей незначительно, что позволяет ее значительно упростить для практических расчетов. Пусть, например, перенос влаги под влиянием внутреннего избыточного давления отсутствует, что характерно для всех низкотемпературных процессов, начальное распределение равномерно ($U_{(0,x)} = U_n = \text{const}$) и уровень влагосодержания ниже предела гигроскопичности. Тогда из системы уравнений (7–9) выпадает уравнение (9) и третьи члены уравнений (7) и (8).

Получающаяся система двух уравнений (5) и (6) может быть представлена в виде системы (14) и (15). При $U_n < U_{п.г.}$ потенциал переноса влаги Θ пропорционален градиенту влагосодержания [2]. Для одномерной системы эта пластина будет иметь вид:

перенос влаги:

$$\frac{\partial U}{\partial \tau} = a' \frac{\partial^2 U}{\partial x^2} + a' \delta \frac{\partial^2 t}{\partial x^2}; \quad (24)$$

перенос тепла:

$$\frac{\partial t}{\partial \tau} = a' \frac{\partial^2 t}{\partial x^2} + \frac{\varepsilon r_0}{c} \frac{\partial U}{\partial \tau}. \quad (25)$$

Граничные условия для неизменного состояния среды (t_c — для уравнения переноса тепла и U_p — для уравнения переноса влаги) или при скачкообразном изменении ее, координированное соответственно по t или U , при конечных значениях критериев Bi и Bi' примут вид граничных условий (ГУ) третьего рода (16) и (17):

перенос влаги:

$$\alpha' \rho_0 (U_n + U_p) + \alpha' \rho_0 (\nabla U)_n + \alpha' \rho_0 \delta (\nabla t)_n = 0; \quad (26)$$

перенос тепла:

$$\alpha(t_c + t_n) - \lambda(\nabla t)_n - (1 - \varepsilon)r_0\alpha'\rho_0(U_n - U_p) = 0. \quad (27)$$

Задача усложняется, если закон изменения внешних параметров задан как некоторая функция, и становится трудно разрешимой, если эта функция априори не будет известна (задачу тогда следует рассматривать как сопряженную).

Условия (24) и (25) упрощаются в частном случае, когда Bi и $Bi' \rightarrow \infty$ (ГУ первого рода). Это равносильно тому, что температура и влагосодержание на поверхности тела (t_n и U_n) равны t_c и U_p .

Уравнения и (24; 25) записаны для постоянных тепловлагокоэффициентов и, если последние существенно переменны, задача становится нелинейной и аналитические неразрешимой. В этих случаях приходится рассматривать применение системы уравнений по этапам, для которых коэффициенты можно усреднить.

Итак, система уравнений (24; 25), будучи значительно более простой, чем система 7–9, позволяет при условиях (26; 27) определить $t = f(\tau, x)$ и $U = f(\tau, x)$ для условий, которыми задались выше.

Для получения функции $U = f(\tau)$ система может быть еще больше упрощена, так как в этом случае достаточно одного исходного уравнения (26), в котором второй член правой части характеризует влияние поля температуры на поле влагосодержания. При малых градиентах температуры (Δt) что соответствует условиям эксплуатации, конструкций [13], уравнение (26) превращается в следующее выражение:

$$\frac{\partial U}{\partial \tau} = a' \frac{\partial^2 U}{\partial x^2}. \quad (28)$$

Граничные условия третьего рода приобретают в этом случае вид:

$$\alpha'\rho_0(U_n - U_p) + \alpha'\rho_0(\nabla U)_n = 0 \quad (29)$$

Практический интерес представляют два случая начального распределения влаги [14]:

1. Параболическое (период падающей скорости следует за периодом постоянной скорости сушки):

$$U = U_{\text{ц}} - \frac{x^2}{R}(U_{\text{ц}} - U_n) = 0, \quad (30)$$

здесь U_n и $U_{\text{ц}}$ — влагосодержание на поверхности и в центре пластины; x — координата, исчисляемая от середины.

2. Равномерное начальное распределение:

$$U_{(0,x)} = U_n = \text{const}, \quad (31)$$

здесь U_n и $U_{\text{ц}}$ — влагосодержание на поверхности и в центре пластины; x — координата, исчисляемая от середины.

Решения уравнения (28) при условиях (30) и (31) имеют вид²:

$$U - U_p = \sum_{n=1}^{\infty} A_n \left[(U_n - U_p) - 2(U_{\text{ц}} - U_n) \left(\frac{1}{HR} - \frac{1}{\mu_n^2} \right) \right] \cos \mu_n \frac{x}{R} e^{\mu_n^2 Fo'}. \quad (32)$$

² Лыков А.В. Теория сушки / А.В. Лыков // Государств-е изд., Москва-Ленинград: 1950 — 416 с.

При ином условии:

$$U - U_p = \sum_{n=1}^{\infty} A_n (U_n - U_p) \cos \mu_n \frac{x}{R} e^{\mu_n^2 Fo'}. \quad (33)$$

В выражениях (32) и (33) A_n — начальная влажностная амплитуда, зависящая от порядкового номера члена ряда и величины критерия Bi' [2]:

$$A_n = \frac{2 \sin \mu_n}{\mu_n + \sin \mu_n \cos \mu_n}, \quad (34)$$

где μ_n — корни характеристического уравнения, определяемого соотношением:

$$ctg \mu = \frac{1}{Bi'} \mu, \quad (35)$$

где Fo' — критерий Фурье для переноса влаги:

$$Fo' = \frac{a' \tau}{R^2}, \quad (36)$$

где a' — коэффициент влагопроводности.

По данным исследования П.С. Серговского³, проведенное при положительной температуре, на древесине сосны, бука и дуба, основное влияние на величину a' оказывает температура древесины (показатель степени при температуре, выраженной в градусах Кельвина, равен 10), условная плотность (чем плотнее древесина безотносительно к ее породе, тем ниже влагопроводность), направление потока влаги (в радиальном направлении a' больше, чем в тангенциальном), местоположение в стволе дерева (влагопроводность ядра и спелой древесины ниже, чем заболони).

Также П.С. Серговским были выведены основные эмпирические выражения для определения средних коэффициентов влагопроводности древесины. Выражения средних коэффициентов влагопроводности древесины в тангенциальном направлении имеют вид:

Для древесины ядра:

$$a'_{\text{тан}} = 0,235 \cdot 10^{-31} T^{10} \rho_{\text{усл}}^{-3,3}. \quad (37)$$

Для древесины заболони:

$$a'_{\text{тан}} = 0,235 \cdot 10^{-31} T^{10} \rho_{\text{усл}}^{-3,9}. \quad (38)$$

Для определения коэффициента влагопроводности в радиальном направлении $a'_{\text{рад}}$ можно воспользоваться отношением [15]:

$$\frac{a'_{\text{рад}}}{a'_{\text{тан}}} = 1 + 2 \frac{V_d}{100}. \quad (39)$$

R — характерный размер (половина толщины пластины).

$$H = \frac{a'}{a'}. \quad (40)$$

Изменение во времени среднего по сечению влагосодержания $\bar{U}$, что определяет кривую сушки, может быть получено из (32) и (33) с использованием зависимости:

$$\bar{U} = \frac{1}{R} \int_0^R U dx. \quad (41)$$

³ П.С. Серговский. Исследование влагопроводности и разработка методов расчета процесса сушки и увлажнения древесины / Автореферат дис. на соискание ученой степени доктора технических наук / М-во культуры СССР. Моск. лесотехн. ин-т. — Москва: [б. и.], 1953. — 43 с.

При параболическом начальном распределении:

$$\bar{U} - U_p = \sum_{n=1}^{\infty} B_n \left[(U_n - U_p) - 2(U_{\eta} - U_n) \left(\frac{1}{HR} - \frac{1}{\mu_n^2} \right) \right] e^{\mu_n^2 Fo'}. \quad (42)$$

При равномерном начальном распределении:

$$\bar{U} - U_p = \sum_{n=1}^{\infty} B_n (U_n - U_p) e^{\mu_n^2 Fo'} \quad (43)$$

или

$$E = \frac{\bar{U} - U_p}{U_n - U_p} = \sum_{n=1}^{\infty} B_n e^{\mu_n^2 Fo'}, \quad (44)$$

где E — безразмерное влагосодержание.

В этих выражениях:

$$B_n = \frac{A_n \sin \mu_n}{\mu_n} = \frac{2Bi'^2}{\mu_n^2 (Bi'^2 + Bi' + \mu_n^2)}. \quad (45)$$

Скорость сушки получается дифференцированием по времени уравнений:

При параболическом начальном распределении:

$$\frac{d\bar{U}}{d\tau} = -\mu_n^2 \frac{a'\tau}{R^2} \sum_{n=1}^{\infty} B_n \left[(U_n - U_p) - 2(U_{\eta} - U_n) \left(\frac{1}{HR} - \frac{1}{\mu_n^2} \right) \right] e^{-\mu_n^2 Fo'}. \quad (46)$$

При равномерном начальном распределении:

$$\frac{d\bar{U}}{d\tau} = -\mu_n^2 \frac{a'\tau}{R^2} \sum_{n=1}^{\infty} B_n (U_n - U_p) e^{-\mu_n^2 Fo'}. \quad (47)$$

Как известно из источника⁴ процесс сушки/увлажнения состоит из двух стадий:

1. Стадия неупорядоченного, нерегулярного режима. В данной стадии существенное влияние оказывает характер начального распределения, функция влагосодержания описывается суммой ряда.
2. Стадия регулярного режима. В данной стадии для описания зависимости достаточно одного члена ряда и функция влагосодержания от времени выражается простой экспонентой.

Обратимся первоначально к стадии регулярного режима. Возьмем за основу уравнения при равномерном начальном распределении (34) и (1). При некотором значении $Fo' > Fo'_1$ быстросходящийся ряд описывается одним первым членом.

Получим

$$\bar{U} - U_p = B_1 (U_n - U_p) e^{-\mu_1^2 Fo'} \quad (48)$$

и

$$-\frac{d\bar{U}}{d\tau} = \frac{a'}{R^2} \mu_1^2 B_1 e^{-\mu_1^2 Fo'}, \quad (49)$$

где B_1 и μ_1^2 — постоянные для первого члена ряда.

⁴ Лыков А.В. Теория теплопроводности / А.В. Лыков // Москва: Высшая школа, 1967. — 599 с.

Подставим величины B_1 из (2) в (3) получим следующее выражение:

$$-\frac{d\bar{U}}{d\tau} = \mu_l^2 \frac{a'}{R^2} (\bar{U} - U_p). \quad (50)$$

Отсюда видно, что скорость сушки в стадии регулярного режима есть линейная функция влагосодержания и не зависит от начальных условий — в выражении (4) отсутствует величина B_1 .

Характеристическое число μ из выражения (35) достаточно точно аппроксимируется тремя членами ряда Тейлора, которые с максимальной погрешностью в 1,75 % (при $Bi = 1$) могут быть заменены более простым выражением [16]:

$$\mu_l^2 = \frac{l}{\frac{4}{\pi^2} + \frac{1}{Bi'}}. \quad (51)$$

Тогда выражение (4) примет вид:

$$-\frac{d\bar{U}}{d\tau} = \frac{l}{\frac{4}{\pi^2} + \frac{1}{Bi'}} \frac{a'}{R^2} (\bar{U} - U_p). \quad (52)$$

Проинтегрировав выражение (6) П.С. Серговский [17] получил выражение для определения продолжительности низкотемпературного процесса сушки древесины в стадии регулярного режима:

$$\tau = \frac{4R^2}{\pi^2 a'} \left(l + \frac{\pi^2}{4HR} \right) \ln \frac{W_n - W_p}{W_k - W_p} = \frac{S^2 \cdot 0,233}{a'} \left(l + \frac{\pi^2}{4HS} \right) \lg \frac{W_n - W_p}{W_k - W_p}, \quad (53)$$

где $S = 2R$.

Для стадии нерегулярного режима аналитические решения становятся слишком сложными и при граничных условиях третьего рода нам неизвестны. Известна лишь формула, полученная И.М. Федоровым [18] графоаналитическим методом.

$$\tau = \frac{S^2 \pi}{16a'} (I - E)^2 + \frac{S\pi}{4a'} (I - E). \quad (54)$$

Однако, как показал Г.С. Шубин [2] для практических расчетов вполне можно ограничиться стадией регулярного режима и сделать допущение, что сушка/увлажнение древесины сразу переходит в стадию регулярного режима.

Уравнение переноса влаги для двух и трехмерной пластины

Дифференциальное уравнение переноса влаги для трехмерной пластины [2] будет иметь вид:

$$\frac{\partial U}{\partial \tau}(x, y, z, \tau) = a' \left(\frac{\partial^2 U}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 U}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 U}{\partial z^2} \right). \quad (55)$$

Краевые условия: равномерное начальное распределение:

$$\tau = 0 \dots U_{(x,y,z,0)} = U_n = const. \quad (56)$$

Граничные условия третьего рода: для поверхности в направлении x (индекс 1):

$$\alpha' \rho_0 [U_{(\pm R_l, y, z, \tau)} - U_p] = \pm \alpha' \rho_0 \frac{\partial U}{\partial x}(\pm R_l, y, z, \tau). \quad (57)$$

Аналогично запишутся условия для двух других поверхностей.

Решение данной задачи для локального влагосодержания в безразмерном виде возьмем из [16]:

$$E = E_1 E_2 E_3 = \frac{U_{(x,y,z,\tau)} - U_p}{U_n - U_p} = \sum_{n=1}^{\infty} \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{k=1}^{\infty} A_{n_1} A_{m_2} A_{k_3} \times \\ \times \cos \mu_{n_1} \frac{x}{R_1} \cos \mu_{m_2} \frac{y}{R_2} \cos \mu_{k_3} \frac{z}{R_3} \times \\ \times \exp[-(\mu_{n_1}^2 F o'_{1} + \mu_{m_2}^2 F o'_{2} + \mu_{k_3}^2 F o'_{3})]. \quad (58)$$

Среднее влагосодержание пластины определяется из выражения:

$$\bar{U}_{(\tau)} = \frac{1}{R_1 R_2 R_3} \int_0^{R_1} \int_0^{R_2} \int_0^{R_3} U_{(x,y,z,\tau)} dx dy dz. \quad (59)$$

Если в него подставить $U_{(x,y,z,\tau)}$:

$$\bar{E} = \sum_{n=1}^{\infty} \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{k=1}^{\infty} B_{n_1} B_{m_2} B_{k_3} \exp[-(\mu_{n_1}^2 F o'_{1} + \mu_{m_2}^2 F o'_{2} + \mu_{k_3}^2 F o'_{3})]. \quad (60)$$

Если ограничиться, как и ранее, рассмотрением решения для одного члена ряда, что справедливо для стадии регулярного режима, то получим:

$$\bar{E}_{общ} = \frac{\bar{U} - U_p}{U_n - U_p} = E_1 E_2 E_3 = B_1 B_2 B_3 = \exp \left[- \left(\mu_{1_1}^2 \frac{a'_{1\tau}}{R_1^2} + \mu_{1_2}^2 \frac{a'_{2\tau}}{R_2^2} + \mu_{1_3}^2 \frac{a'_{3\tau}}{R_3^2} \right) \right]. \quad (61)$$

Здесь $B_1, B_2, B_3, \mu_{1_1}, \mu_{1_2}, \mu_{1_3}$ — соответственно средние по сечению начальные амплитуды и корни характеристического уравнения, записанные для первого члена ряда в каждом из направлений 1, 2, 3. Они определяются и зависят только от величины критерия Bi' , который для многомерного тела будет различным в различных направлениях.

Выражение (61) позволяет определить влагосодержание трехмерной пластины по заданным времени и коэффициентам теплопроводности a' , которые могут быть различны в разных направлениях, чем прямо учитывается анизотропия материала.

Похожим образом можно вывести выражения для локального влагосодержания.

Большой интерес представляет получение зависимости $\tau = f(\bar{E}, z, y, x)$, т. е. выражение для времени в зависимости от влагосодержания. Для этого преобразуем выражение (61):

$$\exp \left[- \left(\mu_{1_1}^2 \frac{a'_{1\tau}}{R_1^2} + \mu_{1_2}^2 \frac{a'_{2\tau}}{R_2^2} + \mu_{1_3}^2 \frac{a'_{3\tau}}{R_3^2} \right) \right] = \frac{B_{1_1} B_{1_2} B_{1_3}}{\bar{E}_{общ}}, \quad (62)$$

$$\mu_{1_1}^2 \frac{a'_{1\tau}}{R_1^2} + \mu_{1_2}^2 \frac{a'_{2\tau}}{R_2^2} + \mu_{1_3}^2 \frac{a'_{3\tau}}{R_3^2} = \ln \frac{B_{1_1} B_{1_2} B_{1_3}}{\bar{E}_{общ}}. \quad (63)$$

Отсюда для трехмерной пластины:

$$\tau_{трехм} = \frac{R_1^2 R_2^2 R_3^2}{\mu_{1_1}^2 a'_{1\tau} R_2^2 R_3^2 + \mu_{1_2}^2 a'_{2\tau} R_1^2 R_3^2 + \mu_{1_3}^2 a'_{3\tau} R_1^2 R_2^2} \ln \frac{B_{1_1} B_{1_2} B_{1_3}}{\bar{E}_{общ}}. \quad (64)$$

Для двухмерной пластины выражение упростится:

$$\tau_{двухм} = \frac{R_1^2 R_2^2}{\mu_{1_1}^2 a'_{1\tau} R_2^2 + \mu_{1_2}^2 a'_{2\tau} R_1^2} \ln \frac{B_{1_1} B_{1_2}}{\bar{E}_{общ}}. \quad (65)$$

Механизм увлажнения древесины сходен с механизмом сушки (при влажности ниже точки насыщения волокна) и отличается от него лишь обратным направлением процесса. При поглощении древесины связанной влаги выделяется теплота сорбции. Основное количество этой теплоты выделяется в диапазонах увлажнения от 0 до 2–3 %, поэтому на практике с этим

приходится встречаться крайне редко. В практических случаях можно без большой погрешности принимать температуру материала равной температуре окружающей среды.

Однако, учитывая гистерезис поглощения, формула должна быть записана в следующем виде:

$$\tau = \frac{S^2 \cdot 0,233}{a'} \left(1 + \frac{\pi^2}{4HS} \right) \lg \frac{W_y - W_n}{W_y - W_k}, \quad (66)$$

где W_y — устойчивая влажность, равная при увлажнении:

$$W_y = (W_p - 2,5) \%. \quad (67)$$

Заключение

Влажность древесины в процессе эксплуатации претерпевает значительные изменения. Изменение влажности древесины следует за влажностью среды с некоторой задержкой. Установившееся значение влажности древесины от влажности среды определяется по диаграмме (рис. 2) и называется равновесной влажностью. Следует также отметить, что установившееся значение равновесной влажности при сушке и увлажнении отличается на величину, называемую гистерезисом поглощения (рис. 1). Для большинства пиломатериала, за исключением мелкоразмерного шпона, гистерезис поглощения составляет 2,5 %. Влажность древесины в каждый конкретный момент времени определяется по зависимости (67), полученной из дифференциальной зависимости переноса влаги (6). Зависимость (67) позволяет определить через какое время W_n достигнет W_k при изменившихся условиях среды, которые соответствуют новой влажности W_y при известной толщине пластины S и известных коэффициентах влагопроводности a' и влагообмена α' .

ЛИТЕРАТУРА

1. Mitchell P.H. Calculating the Equilibrium Moisture Content for Wood Based on Humidity Measurements // BioResources. 2018. — № 1(13). — С. 171–175.
2. Шубин Г.С. Физические основы и расчет процессов сушки древесины / Г.С. Шубин // Лесная про-е изд., Москва: — 1973 — 248 с.
3. Серговский П.С. Гидротермическая обработка древесины / П.С. Серговский // Гослесбуми-е изд., Москва-Ленинград: — 1958 — 440 с.
4. Brémaud I., Gril J. Moisture content dependence of anisotropic vibrational properties of wood at quasi equilibrium: analytical review and multi-trajectories experiments // Holzforschung. — 2021 — № 4(75) — С. 313–327.
5. A. Quartey G., Frank Eshun J., Yaw Wereko E. The Equilibrium Moisture Content of Five Lesser Utilized Species of Ghana Contrasted with Three European Species // Open Journal of Composite Materials. — 2022 — № 02(12) — С. 73–81.
6. Scheepers G., Wiberg P., Johansson J. A method to estimate wood surface moisture content during drying // Maderas. Ciencia y tecnología [Наука и техника леса 19 (вперед)] — 2017 — DOI: 10.4067/S0718-221X2017005000011 — URL: https://www.researchgate.net/publication/315321650_A_method_to_estimate_wood_surface_moisture_content_during_drying.

7. Murr A. Water vapour sorption and moisture transport in and across fibre direction of wood // Cellulose. — 2022 — № 7(29) — С. 4135–4152.
8. Hunter A.J. Equilibrium moisture content and the movement of water through wood above fibre saturation // Wood Science and Technology. — 1995 — Т. 29 — URL: <https://link.springer.com/article/10.1007/BF00229342>.
9. Slováčková B. [и др.]. Diffusion coefficient and equilibrium moisture content of different wood species degraded with *Trametes versicolor* // BioResources. — 2021 — № 2(16) — С. 2570–2588.
10. Liu J., Avramidis S., Ellis S. Simulation of Heat and Moisture Transfer in Wood During Drying under Constant Ambient Conditions // Holzforschung, — 1994 — Т. 48 — № 3 — С. 236–240 — URL: https://www.researchgate.net/publication/249924618_Simulation_of_Heat_and_Moisture_Transfer_in_Wood_During_Drying_under_Constant_Ambient_Conditions.
11. Zeng W. [и др.]. Three-dimensional modeling of moisture transport in wood using near-infrared hyperspectral imaging and X-ray computed tomography in conjunction with finite element analysis // Journal of Wood Science. — 2024 — № 1(70) — С. 9.
13. Лыков А.В. Теория тепло- и массопереноса. / А.В. Лыков, Ю.А. Михайлов // Москва: Госэнергоиздат, 1963. — 535 с.
14. Goli G. [и др.]. Thermal expansion of wood at different equilibrium moisture contents // Journal of Wood Science. — 2019 — № 1(65) — С. 4.
15. Way D., Kamke F.A., Sinha A. Moisture Transport in Wood-Based Structural Panels under Transient Hygroscopic Conditions // Forest Products Journal. — 2020 — № 3(70) — С. 283–292.
18. Серговский П.С. Влагопроводность древесины // Деревообрабатывающая промышленность. — 1955 — № 2 — С. 3–8.
20. Лыков А.В. Теория сушки капилляропористых коллоидных материалов пищевой промышленности / А.В. Лыков, Л.Я. Ауэрман // Москва: Пищепромиздат, — 1946 — 278 с.
21. Серговский П.С. Расчет процессов высыхания и увлажнения древесины /. П.С. Серговский // Ленинград: Гослесбумиздат, 1952. — 79 с.
22. Федоров И.М. Динамика сушки дерева / И.М. Федоров // Отд. техн. информации, Москва: 1937 — 168 с.

Moskalev Mihail Borisovich

Saint Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering, Saint Petersburg, Russia

E-mail: cosccc@gmail.com

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7810-6484>

RSCI: https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=821085

Charnik Dmitriy Gennad'evich

Emperor Alexander I Saint Petersburg State Transport University, Saint Petersburg, Russia

E-mail: charnik_dmitriy@mail.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7170-6105>

Dependence of wood moisture in the process of operation on environmental conditions

Abstract. The author presents an analysis of the main dependences of humidity in wood materials during operation. The article discusses the physical processes that take place during drying/wetting wood and the types of moisture in wood. The article examines the dependence of the equilibrium moisture content of wood on environmental humidity. This dependence is reflected using graphs. It should be noted that the equilibrium moisture content during drying and moistening wood differs by moisture hysteresis. As discussed in the article, when the environmental humidity changes, the humidity in the lumber also changes with a certain delay. This delay is expressed by the equation of the dependence of time on the initial and final moisture content of the wood and the humidity of the environment, as well as the geometry of the lumber in question. To derive this dependence, the differential equation of moisture content in wood is taken as a basis, and later in the article a step-by-step derivation of the dependence of time on changes in moisture content in wood is shown. The article also discusses the prerequisites under which this dependence is derived: humidity below the saturation point, regular drying mode, which is common and uniform initial distribution, no influence of temperature changes on moisture conductivity at small temperature gradients, no moisture transfer under the influence of internal excess pressure.

It should be noted that this dependence for drying and moistening differs slightly and these differences are also discussed in the article.

Keywords: humidity; hydraulic conductivity; operation of wooden structures; moisture content; wooden structures; humidity gradient; temperature gradient