



I. M. Ozarkiv, M. S. Kobrynovich, Zh. Ya. Humeniuk, I. V. Petryshak

Національний лісотехнічний університет України, м. Львів, Україна

КОНТРОЛЬ НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНОГО СТАНУ І ВОЛОГОСТІ ДЕРЕВИНИ В ТЕПЛОМАСООБМІННИХ ПРОЦЕСАХ СУШІННЯ

Сушіння деревини – це обов'язковий технологічний процес у виробництві пиломатеріалів, меблевих заготовель, будівельних деталей тощо. Різні аспекти розглянутих у цьому дослідженні можуть зацікавити фахівців підприємств лісопромислового комплексу. Відомо, що основні форми зв'язку вологи з деревиною (адсорбційний, капілярно-конденсаційний та капілярний зв'язки вільної вологи в порожнинах клітин) залежать від температури та відносної вологості сушильного агента. Це означає, що деревина, як матеріал рослинного походження, поводиться своєрідно залежно від температурно-вологісних полів. Проблема сушіння деревини охоплює питання щодо перенесення тепла і вологи (маси) як у середині тіла, так і в пограничному шарі на межі розподілу фаз "тіло (об'єкт сушіння) – "навколишнє середовище". Треба зазначити, що інтенсивність сушіння є максимальною, коли можливості перенесення тепла і маси в пограничному шарі відповідають можливостям переміщення вологи і тепла всередині об'єкта сушіння. Описано властивості деревини, як природного полімера, що володіє специфічними пружно-в'язкими властивостями. Розкрито механізм перенесення вологи (маси) із центральних шарів об'єктів сушіння до їхніх поверхонь. У теоретичних дослідженнях розглянуто явище всихання як повного, так і у трьох структурних напрямках. Зазначено, що сушіння є складним тепломасообмінним процесом, який супроводжується молекулярною природою та механізмом явищ, що зумовлюють кінетику їхнього перебігу. Показано, що розв'язання відповідних рівнянь молекулярно-молярного перенесення тепла і маси (вологи) за відповідних крайових (граничних) умов дає змогу описати поля, тобто розподілення потенціалів перенесення – температури і вологовмісту в об'єкті сушіння в будь-який момент часу сушіння. Адже криві сушіння (в координатах "швидкість сушіння – вологість матеріалу") і температурні криві (в координатах "температура об'єкта сушіння – вологість об'єкта сушіння") відображають характер перебігу процесу сушіння.

Ключові слова: сушіння; пиломатеріали; тепломасообмінний процес; механізм процесу сушіння; кінетика процесу сушіння; крайові (граничні) умови; потенціали тепломасоперенесення; тепло й вологообмін; поверхневі та центральні зони; об'ємне всихання; анізотропне тіло; деформації.

Вступ. Деревина, як природний полімер, володіє пружно-в'язкими властивостями, тобто в нагрітому вологому стані вона легко деформується як пружно-в'язке тіло, а в сухому стані – як пружне.

Сушіння деревини є складним тепломасообмінним процесом, що супроводжується одночасно зовнішнім теплообміном (передачею теплоти від агента сушіння до поверхні об'єкта сушіння, що обезводнюється), внутрішнім теплообміном (переміщенням тепла по матеріалу завдяки теплопровідності) і вологообміном (випаровуванням вологи з поверхні матеріалу, що висушується) та вологоперенесенням (переміщенням вологи) всередині матеріалу, тобто від глибинних шарів до поверхні об'єкта сушіння.

З огляду на те, що волога з поверхневих зон деревини (дошок, брусків, рейок) швидше випаровується в навколишнє середовище, порівняно з переміщенням вологи від внутрішніх (центральних) шарів об'єкта сушіння

до поверхні, та по товщині матеріалу (об'єкта сушіння) виникає нерівномірне розподілення вологості деревини.

Варто зазначити, що теорія сушіння вологих тіл рослинного походження базується на теорії перенесення тепла та маси (вологи), яку досить ґрунтовно розробили для процесів сушіння акад. О. В. Ликов та його школа. На підставі положень теорії теплоперенесення отримано рівняння для аналізу дослідних даних щодо процесу сушіння вологих матеріалів як за чисто конвективного, так і конвективно-радіального сушіння.

Викладення основного матеріалу. Розмір і форма масивної деревини (пиломатеріалів, паркетної фрези тощо) і деревинних листових матеріалів змінюються із змінами температури агента сушіння (нагрітого повітря, водяної пари, топкових газів) та вологості об'єкта сушіння.

Відомо (Shubin, 1990), що повне об'ємне всихання

Інформація про авторів:

Озарків Ігор Мирославович, д-р техн. наук, професор, кафедра технологій захисту навколишнього середовища, деревини, безпеки життєдіяльності та соціальних комунікацій. **Email:** bzd@nltu.edu.ua

Кобринович Михайло Стефанович, канд. фіз.-мат. наук, доцент, кафедра фізики. **Email:** muchaylokbrynovuch@ukr.net

Гуменюк Жанна Ярославівна, асистент, кафедра ТЗНС і Д, БЖД та СК. **Email:** bzd@nltu.edu.ua

Петришак Ігор Васильович, канд. техн. наук, доцент, кафедра ТЗНС і Д, БЖД та СК. **Email:** borason@ukr.net

Цитування за ДСТУ: Озарків І. М., Кобринович М. С., Гуменюк Ж. Я., Петришак І. В. Контроль напружено-деформованого стану і вологості деревини в тепломасообмінних процесах сушіння. Науковий вісник НЛТУ України. 2018, т. 28, № 10. С. 81–84.

Citation APA: Ozarkiv, I. M., Kobrynovich, M. S., Humeniuk, Z. H., & Petryshak, I. V. (2018). Control of tense-deformed state and moisture of wood in heat and mass transfer during drying process. *Scientific Bulletin of UNFU*, 28(10), 81–84.

<https://doi.org/10.15421/40281017>

визначають за формулою

$$Y_{no.} \cong 0,028 \cdot \rho_6, \% \quad \text{або} \quad Y_{no.} = W_{г.н.} \cdot \frac{\rho_6}{\rho_6}, \quad (1)$$

де: $W_{г.н.}$ – границя насичення, яка для вітчизняних порід становить 28...35 %; ρ_6 – густина води, $\rho_6 = 1000 \text{ кг/м}^3$.

Варто зазначити, що сушіння деревних матеріалів відбувається нерівномірно за товщиною об'єкта сушіння. Дослідженнями, що були проведені в НЛТУ України, встановлено, що величина всихання визначається за такими формулами:

- для об'ємного всихання

$$Y_{no.} = \left(12,0 + \frac{87,5}{S_1} \right) \cdot K; \quad (2)$$

- для повного всихання у тангентальному напрямку

$$Y_{\tau} = \left(0,12 + \frac{2,70}{S_1} \right) \cdot (40 - W_k); \quad (3)$$

- для всихання в радіальному напрямку

$$Y_r = \left(0,12 + \frac{2,70}{S_1} \right) \cdot (40 - W_k), \quad (4)$$

де: S_1 – товщина матеріалу, що висушується, мм; K – множник, який залежить від значення середньої кінцевої вологості матеріалу W_k ($K = 0,93 \dots 0,023 \cdot W_k$);

Обезводнення деревних матеріалів, як відомо (Ozarkiv, 2006; Shubin, 1990; Knysh, 1963; Sokolovskiy et al., 2014), із змінними потенціалами тепломасоперенесення супроводжується наявністю залишкового напружено-деформівного стану, а також зміною більшості фізико-механічних властивостей. Значні за величиною внутрішні напруження є основним стримуючим чинником для інтенсифікації процесу сушіння. Вирішення цієї наукової проблеми ускладнюється тим, що деревина та деревні матеріали належать до класу фізично-нелінійних полімерів, які характеризуються високою гідрофільністю, значною мінливістю структурних та фізико-механічних властивостей.

Необхідно зазначити, що на сьогодні принципово важливі результати в дослідженнях вітчизняних та зарубіжних вчених не повністю відображають складну й багатогранну ситуацію розвитку динаміки деформаційно-релаксаційних процесів у деревині та деревних композитних матеріалах через неврахування їхнього зв'язку із характеристиками тепломасообміну та реальної реологічної поведінки матеріалів. Книш В. А. (Knysh, 1963) у під час дослідження процесу конвективного і радіаційно-конвективного сушіння шпону і буквої клеєної фанери констатує, що границя міцності на розтяг уздовж волокон для всіх способів сушіння лущеного шпону є приблизно однаковим.

Експериментальні дослідження Я. І. Соколовського (Sokolovskiy et al., 2014) щодо вивчення напружено-деформівного стану деревини в процесі сушіння деревини сосни, ялини, берези і дуба дали змогу встановити реологічну поведінку деревини на повзучість, релаксацію та обернену повзучість із врахуванням анізотропії в діапазоні змін вологості $W = 8 \dots 30 \%$ і $t = 20 \dots 35 \text{ }^\circ\text{C}$.

За одновісного напруженого стану для ізотропного матеріалу, властивості якого однакові по всіх напрямках, закон Гука записуємо (Ozarkiv, 2006)

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{E}, \quad (5)$$

де: ε – відносна повздовжня (лінійна) деформація; σ – нормальне напруження; E – модуль пружності (величина, обернена коефіцієнту об'ємного стискування, тобто

$$E = \frac{1}{\beta_v}, \quad \beta_v = \frac{1}{V} \cdot \frac{\partial V}{\partial P}.$$

За ортогональної схеми пружної анізотропії деревини, площинами пружної симетрії є дві повздовжні (радіальна і тангентальна) відносно річних шарів і одна перпендикулярна напрямку волокон площина. Нормалі до цих площин збігаються із напрямком координатних осей, які мають позначення: $a(x)$ – вздовж волокон, $r(y)$ – радіальний напрямок впоперек волокон, $\tau(z)$ – тангентальний напрямок впоперек волокон (рис. 1).

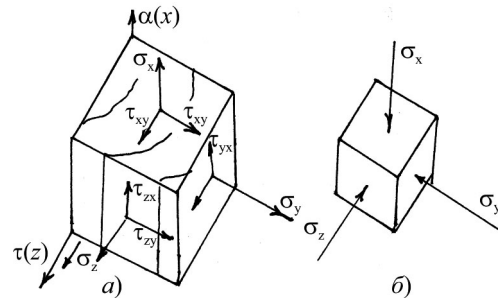


Рис. 1. Головні напрямки пружної симетрії деревини як ортогонального тіла: а) позначення напружень у загальному випадку; б) напружений стан трьохосового рівного стискування

Тоді для анізотропних тіл, у яких величина деформації залежить не тільки від величини діючих напружень, але й від напрямку їхньої дії в матеріалі, закон Гука буде виражатися (Ozarkiv, 2006):

$$\varepsilon_x = \frac{\sigma_x}{E_x} - \frac{\mu_{yx}\sigma_y}{E_y} - \frac{\mu_{zx}\sigma_z}{E_z}; \quad \varepsilon_y = -\frac{\mu_{xy}\sigma_x}{E_x} + \frac{\sigma_y}{E_y} - \frac{\mu_{zy}\sigma_z}{E_z}; \quad (6)$$

$$\varepsilon_z = -\frac{\mu_{xz}\sigma_x}{E_x} - \frac{\mu_{yz}\sigma_y}{E_y} + \frac{\sigma_z}{E_z}; \quad \gamma_{xy} = \frac{\tau_{xy}}{G_{xy}}; \quad \gamma_{yz} = \frac{\tau_{yz}}{G_{yz}}; \quad \gamma_{zx} = \frac{\tau_{zx}}{G_{zx}},$$

де: E – модуль пружності; G – модуль звуку; μ – коефіцієнт поперечної деформації або коефіцієнт Пуассона (перший індекс вказує напрямок поперечної деформації, а другий – напрямок деформації, що викликає її осьове зусилля); γ – кутові деформації.

Подвійні індекси біля модуля зсуву G_{ij} – відповідають напрямкам, між якими відбувається зміна прямого кута. Отже, для встановлення зв'язків між тензорами напружень і деформацій, потрібно мати 12 пружних постійних, із яких 9 постійних є незалежними (Луков, 1967; Ashkenazi, 1978).

Для великих сортиментів деревини, в яких неможливо знехтувати кривизною річних шарів, потрібно використовувати схему трансверсальної ізотропії, тобто коли в площині, перпендикулярній волокнам, пружні властивості у всіх напрямках однакові. Іншими словами, коли враховуються відмінності між властивостями вздовж і уперек волокон. Тоді для трансверсального ізотропного тіла зв'язок між тензорами напружень і деформацій здійснюється з допомогою п'яти пружних постійних. Отже, для встановлення напруженого і деформівного стану деревини на підставі теорії пружності, необхідно знати числові значення пружних постійних деревини.

Основним носієм механічних властивостей деревини є її анізотропний компонент – целюлоза (високоорієнтований полімер). У разі не навантаження деревини вздовж волокон, згідно з Ю. М. Івановим, можна виділити дві області деформування, одна з яких є областю

звичайної пружності, а друга – областю вимушено еластичних деформацій (останні складаються переважно із термозворотних залишкових деформацій). Тоді напруження, що визначатимуть грань (межу) між названими областями, будуть границею вимушеної еластичності деревини. Тобто якщо напруження у другій області діють на набряклу деревину, то вона вийде із стану природного заскління ($n_i \approx 1,52$) і набуде високоеластичних властивостей. Варто зауважити, що високоеластичні деформації зворотні та в десятки разів перевищують миттєві пружні деформації деревини.

Отже, реологічну модель можна представляти (рис. 2) як модель, що складається із послідовно з'єднаних двох моделей: пружного тіла Гука (символічно зображене пружиною з модулем пружності E_2) й еластичного тіла Кельвіна (зображене у вигляді паралельно з'єднаних пружин (модуль пружності E_1) і демфера з рідиною, що має в'язкість η_e).

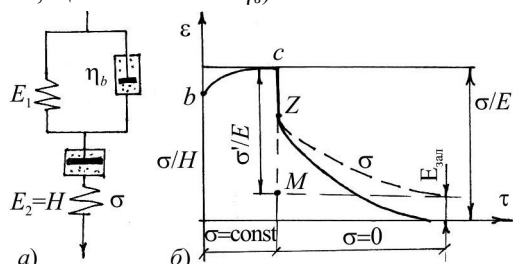


Рис. 2. Реологічна модель деревини: а) схема; б) закономірності її деформації

Для такої моделі залежність напруження σ і деформацію ε опишемо рівнянням

$$\sigma + n\dot{\sigma}^* = nH\varepsilon + E\varepsilon^*, \quad (7)$$

де: H ($H = E_2$) – миттєвий модуль пружності;

- довготривалий модуль пружності, $E = \frac{E_1 \cdot E_2}{E_1 + E_2}$;
- тривалість релаксації, $n = \frac{\eta}{E_1 + E_2}$.

У разі прикладення навантаження миттєво появляється деформація $\sigma = \sigma/H$. Далі, за постійного напруження ($\sigma = const$) зростають еластичні деформації за криволінійним законом (див. рис. 2, б) і завдяки тривалій витримки деформація прямує до величини, що дорівнює $\varepsilon = \sigma/E$. Після розвантаження негайно повертається пружна деформація, а потім зникає еластична деформація. Отже, ця модель повністю відображає поведінку тіла, деформації якого є цілком зворотними.

Необхідно відзначити, що в умовах короткочасної дії порівняно невеликих навантажень деревина веде себе як пружне тіло. Нагадуємо, що деформації визначають зміну лінійних і кутових розмірів тіла і характеризують стан окремих його ділянок. Найбільш просто визначаються часові та залишкові деформації і напруження для випадку одноосового напруженого стану, що спостерігаємо під час підведення теплоти до довгих вузьких смужок або термооброблення прямолінійних кромek елементів.

Деформації в деревині проявляються у поперечному до довжини волокон напрямку. Можуть бути пружні деформації деревини, які за тривалого сушіння (підведення тепла) викликають деформацію пружної післядії (іноді їх називають пружно-еластичні), та залишкові (незворотні) з одночасним перебігом їх у часі в поперечному перерізі висушуючого сортимента. При цьому,

під дією пружних деформацій, деревина, як пружно-в'язке тіло, може залишково розтягуватися або стискатися, особливо у вологому і нагрітому стані. У цьому разі пружна деформація самодовільно переходить у залишкову, фіксуючи новий розмір об'єкта сушіння (характерно для першої стадії сушіння). На другій стадії сушіння проходять явища, протилежні до описаних вище, тобто у внутрішній зоні шарів виникла залишкова деформація розтягу, а в зовнішній зоні – стиску.

Поступове зменшення (релаксація) розтягуючих пружних деформацій для центральних шарів деревини і стискаючих для поверхневих (зовнішніх) шарів відбувається і після досушування. Іншими словами, суть релаксації саме полягає в переході пружних деформацій (тобто напружень в деревині) в залишкові. При цьому сама релаксація відбувається спочатку по крутоспадній (експоненціальній) кривій, а потім наближається до своєї горизонтальної асимптоти (див. рис. 2, б). За одиницю часу релаксації беремо період, упродовж якого величина початкових напружень зменшується в $e = 2,72$ рази. Цей час визначаємо за формулою

$$\tau = \frac{\eta_e}{E_1 + H} = A \cdot \exp\left[-\frac{U_a}{k \cdot T}\right], \quad (8)$$

де: η_e – коефіцієнт в'язкості тіла; H – миттєвий модуль пружності в напрямку навантаження; E_1 – додатковий пружний зв'язок; k – постійна Больцмана; U_a – енергія активації релаксаційного процесу; T – абсолютна температура тіла; A – коефіцієнт.

У разі постійного навантаження σ в часі τ розвиток деформацій ε зображено на рис. 2, б (графік у точці С). У точці С навантаження миттєво скинене, тоді відрізок CL буде показувати пружну деформацію, а відрізок LM – деформацію пружної післядії, тобто еластичну. Тоді, з урахуванням цих параметрів, буде справедливе рівняння

$$\varepsilon(\tau H + E) = \sigma(\tau + 1), \quad (9)$$

де: ε – відносна деформація; E – модуль пружності в напрямку навантаження.

Отже, величина напружень σ із рівняння (9) становитиме

$$\sigma = \frac{\varepsilon \cdot (\tau \cdot H + E)}{\tau + 1}. \quad (10)$$

У випадку, коли $\tau \approx 0$, то $\sigma \approx \varepsilon \cdot E$ (відбувається переважно пружна деформація). Потім, через наявність градієнта вологості, зростають і розвиваються залишкові деформації. Отже, залишкові деформації породжуються пружними і наступають за ними по швидкості зростання, а їхня величина буде залежати від тривалості дії і величини пружних деформацій.

Висновки:

1. Інтенсифікація тепломасообмінних процесів базується на наукових основах технології сушіння, що підтверджено дослідженнями О. В. Ликова, П. С. Сергоського, Г. С. Шубіна, В. А. Книша, І. В., Кречетова та ін.
2. У деревині, як капілярно-пористому колоїдному тілі, спостережено різні форми й види зв'язку вологи з каркасом (макро- і мікробудовою) об'єкта сушіння.
3. У процесі обезводнення вологого матеріалу значну роль відіграють термодинамічні, теплофізичні, масообмінні, структурно-механічні, оптичні (терморадіаційні та спектрометричні) властивості деревини.

Перелік використаних джерел

- Ashkenazi, E. K. (1978). *Anizotropiia drevesiny i drevesnykh materialov*. Moscow: Forest industry, 224 p. [In Russian].
- Knysh, V. A. (1963). Issledovanie protessa konvektivnoi i radiatsionno-konvektivnoi sushki shpona. *Abstract of Candidate Dissertation for Technical Sciences*. Lviv: LLTI, 308 p. [In Russian].
- Lykov, A. V. (1967). *Teoriia teploprovodnosti*. Moscow: High School, 599 p. [In Russian].

- Ozarkiv, I. M. (2006). *Naukovo-tekhnichni osnovy konvektivno-radiatsiinoho sushinnia derevyny. Abstract of Doctoral Dissertation for Technical Sciences*. Lviv: NLTU Ukraine, 404 p. [In Ukrainian].
- Ozarkiv, I. M., Soroka, L. Ya., & Hrytsiuk, Yu. I. (1997). *Fundamentals of aerodynamics and heat-mass exchange*. Tutorial. Kiev: View of the IZMN. 280 p. [In Ukrainian].
- Shubin, G. S. (1990). *Sushka i teplovaia obrabotka drevesiny*. Moscow: Forest industry, 336 p. [In Russian].
- Sokolovskyi, Ya. I., Shabatura, Yu. V., Vykliuk, Ya. I., et al. (2014). *Modeliuvannia system u GPSS WORLD*. Lviv: Novyi svit-2000, 288 p. [In Ukrainian].

И. М. Озаркив, М. С. Кобринович, Ж. Я. Гуменюк, И. В. Петришак
Національний лесотехнічний університет України, г. Львів, Україна

КОНТРОЛЬ ПРУЖНО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СТАНА И ВЛАЖНОСТИ ДРЕВЕСИНЫ В ТЕПЛОМАССОБМЕННЫХ ПРОЦЕССАХ СУШКИ

Сушка древесины – это обязательный технологический процесс в производстве пиломатериалов, мебельных заготовок, строительных деталей. Разные аспекты рассмотренных в статье проблем представляют интерес для специалистов предприятий лесопромышленного комплекса. Известно, что основные формы связи влаги с древесиной (адсорбционная, капиллярно-пористая та капиллярная связи свободной влаги в пустотах клеток) зависят от температуры та влажности сушильного агента. Это означает, что древесина, как материал растительного происхождения, ведет себя своеобразно в зависимости от температурно-влажностных полей. Проблема сушки древесины включает в себя вопросы перемещения тепла и влаги (массы), как внутри тела, так и в приграничном слое на границе раздела фаз "тело (объект сушки) – "окружающая среда". Нужно отметить, что интенсивность сушки есть максимальной, когда возможности перемещения тепла и массы в приграничном слое отвечают возможностям перемещения влаги и тепла внутри объекта сушки. Описаны свойства древесины, как натурального полимера, который обладает специфическими упруго-вязкими свойствами. Раскрыт механизм переноса влаги (массы) из центральных слоев объектов сушки к ним поверхностным слоям. В теоретических исследованиях раскрыто явление усушки как полного, так и в трех структурных направлениях. Отмечено, что сушка есть сложным тепломассообменным процессом, который сопровождается молекулярной природой и механизмом явлений, которые обуславливают кинетику их протекания. В работе показано, что решение соответствующих уравнений молекулярно-молярного переноса тепла и массы (влаги) при соответствующих граничных (краевых) условиях позволяет описать поля, то-есть распределение потенциалов переноса – температуры и влагосодержания в объекте сушки в определенный момент времени. Ведь кривые сушки (в координатах "скорость сушки – влажность материала" и температурные кривые (в координатах "температура объекта сушки – влажность материала" отображают характер протекания процесса сушки.

Ключевые слова: сушка, пиломатериалы, тепломассообменный процесс, механизм процесса сушки, кинетика процесса сушки, краевые (граничные) условия, потенциалы тепломассопереноса, тепло и влагообмен, анизотропное тело, деформации.

I. M. Ozarkiv, M. S. Kobrynovich, Z. H. Humeniuk, I. V. Petryshak
Ukrainian National Forestry University, Lviv, Ukraine

CONTROL OF TENSE-DEFORMED STATE AND MOISTURE OF WOOD IN HEAT AND MASS TRANSFER DURING DRYING PROCESS

Wood drying is a compulsory technological process in the production of lumber, furniture billets, building components, etc. Various aspects of the problems discussed in the article are of interest to forestry enterprises specialists. The main forms of moisture communication with wood (adsorption, capillary condensation and capillary bond of free moisture in cell cavities) are known to depend on the temperature and relative humidity of the drying agent. This means that wood being a material of plant origin behaves in a peculiar way, depending on the temperature and humidity fields. The problem of wood drying includes the issue of heat and moisture (mass) transfer, both in the middle of the body and in the boundary layer at the interface of the phases "body (object of drying) -" environment ". We should note that the intensity of drying is of maximum value when the possibility of heat and mass transfer in the boundary layer corresponds to the possibilities of moisture and heat movement inside the object of drying. Furthermore, the characteristics of wood as a natural polymer possessing specific elastic viscous properties are described. The mechanism of moisture (mass) transfer from the central layers of drying objects to their surfaces is identified. The phenomenon of drying, both complete and in three structural directions, is highlighted in theoretical studies. Moreover, drying is noted to be a complicated heat and mass transfer process, which is characterized by the molecular nature and mechanism of the phenomena determining the kinetics of their flow. In the course of the study we have revealed that the solution of the corresponding equations of molar and molecular heat and mass (moisture) transfer under the corresponding boundary conditions enables describing the fields, i.e. the distribution of the transfer potential – temperature and moisture content in the object of drying at any moment of drying time. Therefore, the drying curves (in the coordinates of the "drying rate – material humidity") and the temperature curves (in the coordinates "the temperature of the drying object – the humidity of the drying object ") reflect the nature of the drying process.

Keywords: drying; lumber; heat and mass transfer process; mechanism of drying; drying kinetics; marginal conditions; heat transfer potential; heat and moisture exchange; surface and central areas; volumetric drying; anisotropic body; deformation.