



Р. Р. Курка, Б. П. Поберейко

Національний лісотехнічний університет України, м. Львів, Україна

ЗАСТОСОВНІСТЬ НАЯВНИХ МЕТОДІВ ІДЕНТИФІКАЦІЇ ПОЛІВ НАПРУЖЕНЬ У ПИЛОМАТЕРІАЛАХ ДЛЯ АВТОМАТИЗОВАНИХ СИСТЕМ КЕРУВАННЯ ПРОЦЕСОМ СУШІННЯ ДЕРЕВИНИ

Незважаючи на значний розвиток потужності обчислювальних засобів, наявності великої кількості теоретичних розробок та результатів числових експериментів, практичне визначення напруженого стану деревини у процесі сушіння досі залишається складним технічним завданням. З'ясовано, що у численних опублікованих наукових дослідженнях автори намагаються пов'язати розподіл вологості у висушуваних пиломатеріалах із розподілом напружень та деформацій, використовуючи відомі технічні прийоми та засоби. Встановлено, що більшість сучасних систем керування процесом сушіння використовують як вхідні сигнали тільки параметри вологості та температури деревини та навколишнього середовища без урахування інформації про поточний розподіл напружень, що виникають у перерізі висушуваних пиломатеріалів. Досліджено, що оцінювання якості процесу сушіння за остаточним результатом не дає змоги встановити, чи всі стадії режиму сушіння задовольняють вимогу збереження цілісності деревини. Відповідно, внаслідок прийняття хибних рішень щодо інтенсивності видалення вологи, зростає її тривалість та підвищуються загальні енерговитрати. Доведено потребу доповнення наявних систем автоматичного керування додатковою інформацією про розвиток напружень у деревині під час сушіння, яка може не тільки істотно покращити якісні та економічні показники, але й докорінно змінити стратегію перебігу самого процесу. Проаналізовано застосовність наявних засобів ідентифікації полів напружень у висушуваних пиломатеріалах та сформульовано основні критерії їх порівняння щодо можливості практичного використання. Виявлено відсутність прямих способів вимірювання розподілу напружень, що виникають у процесі сушіння деревини. Визначено обмеження, які мають наявні технічні засоби та математичні моделі щодо застосування у системах автоматизації процесу сушіння деревини. Встановлено потребу розроблення прямого способу оцінювання напружено-деформованого стану деревини. Обґрунтовано доцільність розроблення математичної моделі закономірностей розвитку полів напружень у висушуваних пиломатеріалах для вдосконалення наявних систем керування сушарками.

Ключові слова: силові секції; диференціальна усадка; акустична емісія; імпульсна акустична емісія; цифрова кореляція зображень; ближня інфрачервона спектроскопія.

Вступ / Introduction

Незважаючи на інтенсивний розвиток обчислювальних технологій та штучного інтелекту для керування процесами гідротермічного оброблення та сушіння деревини застосовують технічні засоби, які у своєму математичному підґрунті містять теоретичні дослідження та практичні результати, отримані ще у XX столітті. Основним критерієм, за яким приймають рішення про перебіг технологічного процесу сушіння, є вологість деревини. Відсутність прямих способів визначення вологості деревини та складність вимірювання її розподілу вносять великі похибки у характер зміни параметрів сушильних агрегатів упродовж усього технологічного

процесу. Зважаючи на зазначене вище, інженери-технологи приймають компромісні рішення, які за рахунок зниження інтенсивності термовологісного оброблення забезпечують деревину від розтріскування, спричиненого нерівномірним розподілом напружень. Як наслідок, навіть за умови отримання якісних заготовок за критеріями досягнення заданої вологості та відсутності явних механічних ушкоджень ми не можемо бути впевненими у подальшому збереженні їх властивостей у готових виробах. Це зумовлено відсутністю достовірної інформації про розподіл внутрішніх полів напружень як у процесі сушіння деревини, так і після його завершення.

Саме тому побудова аналітичних залежностей, які встановлюють закономірності розвитку полів напру-

Інформація про авторів:

Курка Роман Романович, аспірант, асистент, кафедра автоматизації та комп'ютерно-інтегрованих технологій.

Email: roman.kurka@nltu.edu.ua; <https://orcid.org/0000-0003-3057-1413>

Поберейко Богдан Петрович, д-р техн. наук, професор, кафедра автоматизації та комп'ютерно-інтегрованих технологій.

Email: bohdan.pobereyko@nltu.edu.ua; <https://orcid.org/0009-0006-0323-949X>

Цитування за ДСТУ: Курка Р. Р., Поберейко Б. П. Застосовність наявних методів ідентифікації полів напружень у пиломатеріалах для автоматизованих систем керування процесом сушіння деревини. Науковий вісник НЛТУ України. 2025, т. 35, № 2. С. 101–109.

Citation APA: Kurka, R. R., & Pobereyko, B. P. (2025). Suitability of existing methods for identifying stress fields in lumber for automated wood drying control systems. *Scientific Bulletin of UNFU*, 35(2), 101–109. <https://doi.org/10.36930/40350211>

жень у висушуваних пиломатеріалах у процесі їх взаємодії із зовнішнім середовищем, є актуальним завданням. Для його вирішення потрібно мати інформацію про напружений стан деревини у процесі її сушіння, отриману в експериментальний спосіб. Тому виникає потреба в аналізі наявних способів і методів практичного дослідження полів напружень у деревині для виявлення таких, які застосовні у сучасних системах керування процесом сушіння.

Об'єкт дослідження – встановлення придатності наявних методів ідентифікації полів напружень у висушуваних пиломатеріалах.

Предмет дослідження – методи і засоби експериментального дослідження закономірностей розвитку полів напружень у висушуваних пиломатеріалах, що дасть змогу застосувати їх як джерело вхідного сигналу для автоматизованої системи керування процесом сушіння.

Мета роботи – проаналізувати наявні практичні методи вимірювання та способи ідентифікації полів напружень у деревині, що дасть змогу визначити їх придатність для практичного використання у технологічному процесі висушування пиломатеріалів.

Для досягнення зазначеної мети визначено такі основні завдання дослідження:

- проаналізувати й оцінити наявні практичні методи аналізу розвитку полів напружень у висушуваних пиломатеріалах, що дасть змогу окреслити можливі способи вдосконалення наявних стратегій прийняття рішень про режими сушіння деревини;
- структурувати відібрані методи за аналізованими параметрами, використаними технічними засобами, а також їхньою придатністю для технологічного контролю та керування процесом сушіння деревини, що дасть змогу сформулювати на їх основі вимоги до апаратно-програмних технічних засобів контролю напружень у висушуваних пиломатеріалах;
- окреслити стратегію подальших експериментальних і теоретичних досліджень щодо прямих способів вимірювання напружень у висушуваних пиломатеріалах, які мали б перспективи практичного використання, що уможливить верифікацію та коригування наявних режимів функціонування автоматизованих систем керування процесом сушіння деревини.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Технологія сушіння спирається на сукупність можливих керованих факторів впливу та технічні засоби, за допомогою яких реалізують ефективне зменшення вологості пиломатеріалів із певними початковими параметрами [47]. У роботі [18] доведено, що від моменту заготівлі до початку процесу сушіння деревина зазнає впливу змінних температурних і вологісних умов навколишнього середовища, які істотно змінюють її реологічні властивості. У роботі [2] проаналізовано процеси взаємодії вологи із деревиною і показано, що нерівномірність розподілу вологості в перерізі істотно впливає на ефективність функціонування систем керування сушінням. Наявні технічні засоби дають змогу вимірювати вологість деревини як усереднену величину для зразків певного перерізу і форми [12]. Відповідно адекватне вимірювання розподілу вологості неруйнівними методами [22] потребує значних витрат і неприйнятне для практичного використання.

У теоретичних дослідженнях [19, 26, 44] розглянуто залежність полів напружень у висушуваних матеріалах від розподілу вологості. Авторами довели, що інформа-

ція про напружений стан деревини важлива, однак складність отримання зводить нанівцець практичне використання її у процесі сушіння деревини. Відсутність технічних засобів, які б гарантували можливість визначення напружень у довільній точці перерізу матеріалу, зумовила появу цілої низки методів досліджень [4, 5, 21, 32], що дають змогу встановити тільки приблизні закономірності для деяких порід деревини. Тобто на практиці можемо проаналізувати результати сушіння стандартними методиками [10], однак не можемо констатувати, що отриманий стан деревини задовольняє вимоги до її подальшої експлуатації.

У роботі [28] експериментально досліджено вплив зміни відносної вологості червоного дуба на напруження розтягування та стискання, які виникають перпендикулярно до волокон. Структура напружень є такою, що максимальні деформації розтягування у зовнішніх зрізах і максимальні деформації стискання в центральних зрізах були приблизно одного порядку величини для різних досліджуваних режимів видалення вологості. Величина зовнішньої усадки була пропорційна збільшенню жорсткості режиму сушіння деревини. Для зразка розміром 2 дюйми вона почалася із моменту початку сушіння та тривала з постійною швидкістю, поки не пришивидшилася в період між зміною знаку напружень у зовнішніх зонах. Після цього усадка відновилася з постійною швидкістю. Швидкість усадки стрімко зросла внаслідок стрімкого зниження відносної вологості середовища на першому етапі процесу сушіння зразка. Усадка, деформація розтягування і зовнішнє всихання розпочалися, коли вологість лише невеликої частини перерізу деревини знизилася нижче від точки насичення волокон. В основу дослідження покладено візуальний контроль напруження у відпиляному зразку – секції.

У роботі [38] запропоновано вимірювати відносну вологість зразків масовим методом та пов'язати миттєвий стан вологості деревини із напруженнями, які в ній виникають у процесі сушіння. Автор запропонував шукати раціональні комбінації керованих факторів процесу сушіння за критерієм мінімізації напружень у відпиляних зразках (секціях). Виконуючи їх візуальний аналіз, автор побудував таблиці рекомендованих значень умов зовнішнього середовища для різних етапів зниження вологості пиломатеріалів. Надалі на їх основі реалізовано автоматичну систему керування процесом сушіння деревини із наперед визначеними фазами, зміна яких відбувається на основі вимірювання середньої вологості зразків.

У роботі [48] досліджено закономірності перенесення вологи та розвитку полів напружень ялиці китайської під час високотемпературного сушіння. Автори за допомогою ядерного магнітного резонансу (ЯМР) вимірювали розподіл зв'язаної та вільної вологи в кожному шарі пиломатеріалів. Залишкові напруження, що виникають у процесі сушіння, визначали за допомогою методу силових секцій. У кожному шарі по товщині матеріалу спостережено різний вміст вологи, внаслідок чого градієнт розподілу спочатку збільшувався, а потім зменшувався, що узгоджується з тенденцією зміни напружень під час сушіння ялиці китайської. Відношення зв'язаної вологи до вільної було різним у кожному шарі, що вказує на нерівномірне перенесення її по товщині зразків. Автори встановили, що залишкові напруження були більшими за відповідні напруження сушіння, хоча

ця різниця поступово зменшувалася, що свідчить про значний вплив на цей процес градієнта вологості, який постійно змінюється у процесі сушіння деревини.

У роботі [41] сформульовано спосіб безперервного неруйнівного вимірювання деформації сушіння деревини. Він ґрунтується на гіпотезі, що вплив напружень під час сушіння на усадку зменшується зі зменшенням ширини дошки. Штор досліджував поведінку зразків завширшки 150, 100, 50, 30, 10, 2 і 0,5 мм. Їх було вирізано так, щоб радіусна лінія, перпендикулярна до річних кілець, була в центрі ширини кожного зразка. Сушіння проводили у кліматичній камері за постійної температури 30°C і відносної вологості 56 %. Як наслідок, отримано значення усадки ширини секцій для різних режимів сушіння деревини. Незважаючи на велику кількість вимірювань на різних стадіях процесу, було отримано лише наближені залежності рівня усадки від вологості деревини, спотворені значним коробленням зразків. Автор довів, що різницю усадки потенційно можна використати як параметр керування в автоматизованій системі керування процесом сушіння деревини, що дає змогу досягти максимальної швидкодії процесу з мінімальним погіршенням якості висушуваних пиломатеріалів.

У роботі [15] автори експериментально дослідили окремі компоненти внутрішніх деформацій у процесі сушіння деревини сосни за допомогою методу диференційної усадки. Встановлено принципи виникнення внутрішніх напружень та їх зв'язок із явищем усадки. Вимірювання дали змогу виявити розподіл пружних деформацій для різних значень вологості деревини та природу їх виникнення. Особливістю запропонованої експериментальної методики є застосування у процесі досліджень зразків, отриманих із колових зрізів – дисків, які висушують за стабільної температури 40 °C.

У роботі [6] автори експериментально дослідили процеси релаксації напружень у висушуваній деревині за умови розтягування під час сушіння за високої температури і тиску пари за допомогою тензометричного давача. Згідно з результатами дослідження, вплив температури на релаксацію напружень був набагато значнішим, ніж вплив рівня деформації. Релаксація напружень стрімко зростала, а залишкові напруження швидко зменшувалися з підвищенням температури. У процесі аналізу стану висушуваної деревини отримано експериментальні графічні залежності, які описують взаємозв'язок між напруженнями, температурою оброблення і відносною вологістю зразка під час високотемпературного парового сушіння.

У роботі [3] автори описують результати експериментального застосування методу акустичної емісії для визначення напружень у деревині дуба європейського. Основною метою досліджень було оцінювання граничного напруженого стану деревини способом аналізу зміни акустичного випромінювання в разі появи невеликих тріщин. Значна інерційність процесу термовологісного оброблення давала можливість використати цей метод як сигнал раннього попередження для системи автоматичного керування процесом сушіння деревини.

У роботі [8] досліджено розвиток напружень у висушуваних пиломатеріалах методом акустичної емісії зі застосуванням звукових або ультразвукових сигналів. Для експерименту використовували зразки деревини ялини із розмірами 24×140×220 мм та попередньо якісно обробленими поверхнями. Ці зразки, розміщені шта-

белями, було висушено в лабораторних умовах за температури 80 °C та відносної вологості повітря в сушильній камері 22 %. Окрім цих зразків, у печі перебували інші зразки, на яких визначали вологість, а також градієнт вологості та усадку. Аналогічні за параметрами та способом формування акустичні хвилі автори пропускали через висушуваний та попередньо навантажений певним зусиллям зразки деревини із однаковими геометричними параметрами. Аналіз амплітуди та частоти акустичних сигналів, що поширюються, дають змогу оцінити значення напружень, спричинених процесом сушіння.

У роботі [25] висвітлено деякі аспекти застосувань акустичної емісії для дослідження механізмів пошкодження у процесі сушіння деревини. Автор проаналізував основні способи збудження та фіксації коливань у перерізі матеріалу, виявлено значну нелінійність отримуваних вихідних сигналів для різних порід деревини. Ландіс зазначає, що анізотропія властивостей, наявність природних дефектів та зміна термовологісного стану висушуваного матеріалу нівелюють переваги цього неруйнівного методу контролю напружень. Особливі проблеми виникають у процесі вибору місця контролю, способу збудження та детектування акустичних хвиль.

У двох послідовних публікаціях [30, 31] автори за допомогою адаптивної системи нейронечіткого виводу (ANFIS) та нейромережевого моделювання (NN) досліджували вплив гідротермічного оброблення на фізико-механічні властивості термічно модифікованої деревини, а також на швидкість поширення звукових хвиль. Сигнал обробляли в часовій і частотно-часовій областях. За допомогою вейвлет-аналізу виділяли його різні ознаки для навчання нейронної мережі. Автори зробили висновок, що запропонована адаптивна система нейронечіткого виводу може бути застосована для прогнозування коефіцієнта набухання деревини, рівноважного вмісту вологи та водопоглинання відповідно. Застосування імпульсних акустичних сигналів, комплексу акселерометрів та штучної нейронної мережі показало низьку якість оцінювання напружень під час процесу сушіння пиломатеріалів, значний вплив на отримані результати температури та відносної вологості деревини.

Метою дослідження [37] було визначення величини механіко-сорбційної та в'язко-пружної повзучості на початку сушіння та вивчення залежності повзучості від зміни вологості та рівня навантаження. Автори проводили всі вимірювання в тангенціальному напрямку перпендикулярно до волокон деревини дуба червоного. Механосорбційну повзучість вимірювали двома різними методами. Перші експерименти були призначені для вимірювання механосорбційної повзучості в реальних умовах сушіння. Друга група експериментів була призначена для вимірювання впливу навантаження, а також для зміни вологості на розвиток механосорбційної повзучості. Результати показують, що механосорбційна повзучість є основною деформацією на початку сушіння. Величина повзучості була лінійною функцією зміни вологості від початкового стану і зростала зі зменшенням вмісту вологи у деревині. В'язко-пластична складова частини повзучості була невеликою і залежала від прикладеного навантаження. Автори дослідження застосували безконтактний аналіз напруженого стану тонких зрізів деревини оптичними методами цифрової кореляції зображень.

У роботі [20] досліджено усадку та напруження під час сушіння деревини сосни звичайної в печі та вивчено поперечну усадку і зміну вологості в тонких зразках за допомогою цифрового аналізу зображень і ближньої інфрачервоної спектроскопії, відповідно. Вплив товщини зразків від одного до 10 мм на усадку було проаналізовано в реальних умовах. Усадку, зумовлену вмістом води, було подано у вигляді експоненціальної функції та лінійної функції вище і нижче від точки насичення деревини, відповідно. Автори довели, що застосованими методами можна вимірювати поперечну усадку в процесі сушіння, яка є важливою під час аналізу напружень, що розвиваються у висушуваних пиломатеріалах.

У роботі [14] автори дослідили пружну деформацію, в'язкопружну деформацію повзучості та механосорбційну деформацію повзучості, спричинену анізотропією усадки, використовуючи метод аналізу зображень під час повільного сушіння дисків білої берези. Реологічні властивості дерев'яних дисків з різним вмістом води аналізували разом із впливом її радіального положення на кожну деформацію. Результати показали, що співвідношення між напруженням та деформацією є складними. Дослідники довели експериментально, що анізотропія усадки була основною причиною деформації під час процесу сушіння, і вона була одним з основних факторів, що спричиняють тріщини деревини білої берези. Використовуючи метод цифрової кореляції зображень, автори розраховували довжину зразка в процесі аналізу напруженого стану на різних стадіях зміни вологості деревини для встановлення зв'язку між напруженнями і деформацією у процесі її сушіння.

У роботі [43] досліджено поглинання ближнього інфрачервоного випромінювання деревини ситської ялини. Автори в експериментах застосували зразки, які мали різний ступінь шорсткості поверхні і різну орієнтацію цих волокон до напрямку падаючого світла. Результати цих вимірювань показали, що орієнтація волокон і шорсткість поверхні деревини безпосередньо пов'язані з поглинанням. Окрім цього, доведено, що поведінку дифузно відбитого світла в деревині можна виразити теорією Кубелки-Мунка і поділити на три категорії відповідно до характеристики коефіцієнта поглинання і розсіювання. На основі цих результатів дослідники запропонували концепцію поведінки інфрачервоного світла, що проходить через матеріал, виготовлений з порожнистих волокон.

У роботі [46] автори за допомогою ближньої інфрачервоної спектрометрії виконали прогнозування поверхневої вологості сосни корейської з низьким вмістом води і високим вмістом води вище від точки насичення. Спектри поглинання у ближній ІЧ-області для круглих зразків отримано за температури 25 °С. Автори запропонували регресійну модель прогнозування поверхневого вологовмісту, отриману внаслідок проведення експериментів. Зроблено висновок про те, що за розширення діапазону значень вологості, внесених до моделі прогнозування, її похибка значно зростала.

У роботі [45] запропоновано неруйнівний метод швидкого вимірювання рівня напружень на поверхні деревини, що є важливим для систем автоматизованого керування процесом сушіння деревини. Дослідники запропонували регресійні моделі, отримані методом найменших квадратів для прогнозування поверхневих деформацій, що були розроблені з використанням

спектрів ІЧ-спектроскопії, отриманих із зразків під час сушіння японського кедр. За результатами аналізу з'ясовано, що довжини хвиль близько 2,035 нм роблять значний внесок у прогнозування напружень. Ортогональне коригування сигналу виявилось ефективним способом попереднього оброблення для зменшення кількості факторів, потрібних для моделі з використанням діапазону довжин хвиль 1,300-2,500 нм. Час досягнення максимального розтягувального напруження і точку зміни знаку напруження на поверхні деревини під час сушіння було визначено правильно для 75 % оброблених зразків. Результати, які отримали автори, показують, що неруйнівний метод швидкого NIRS-вимірювання рівня напружень на поверхні деревини є важливим для удосконалення систем автоматизованого керування процесами сушіння деревини.

Аналіз експериментальних досліджень, наведених у згаданих вище джерелах, доводить потребу формулювання системи критеріїв, за якими можна порівняти застосовані в них методи та отримані результати на придатність до практичного використання. Це надалі дасть змогу ідентифікувати сукупність вимог до аналітичних залежностей, технічного забезпечення та програмних засобів, які необхідно розробити для застосування інформації про напружений стан деревини у сучасних системах автоматичного керування процесом сушіння деревини.

Результати дослідження та їх обговорення / Research results and their discussion

Практичне застосування методу силових секцій для отримання додаткового вхідного сигналу для системи керування на сучасному етапі можливе тільки в комбінації із сучасними оптичними пристроями, що реалізують метод цифрової кореляції зображень [23]. Перевагою такого підходу є можливість аналізу напруженого стану деревини дистанційно. Однак складність забезпечення працездатності оптичної підсистеми в реальних умовах сушильної камери зводить нанівець перспективу реального впровадження. Окрім цього, відсутність чітких аналітичних залежностей поведінки відпиляного зразка потребує значних витрат на практичну реалізацію навіть за умови обмеженої кількості порід деревини, для яких він може бути використаний.

Метод диференційної усадки має потребу використання засобів контролю переміщень у багатьох точках, придатних для вимірювання в умовах значного перепаду температур, однак їхня вартість доволі висока, а застосування обмежується лабораторними дослідженнями. Наявність великої бази знань щодо поведінки усадки деревини у процесі сушіння дають змогу побудувати стандартну вимірювальну систему за умови імплементації методу цифрової кореляції зображень [17]. Однак головною проблемою цього методу є складність первинної підготовки як зразка, так і самої вимірювальної системи, які істотно впливають на отримані результати. Тому можна вважати цей метод мало придатним для коригування чи регулювання процесу сушіння в реальних виробничих умовах.

Метод акустичної емісії у різних його варіантах спирається на систему передавач-приймач та використовує взаємодію акустичної хвилі із деревиною. Практична імплементація методу потребує додаткового каналу вимірювання зусилля та поточного контролю вологості

зразка. Застосування методу на практиці обмежене відсутністю промислових зразків приймачів-передавачів звукових коливань, які можуть працювати у широкому діапазоні температур та за умов агресивного середовища. Основним обмеженням є велика методична похибка, яка може виникнути за умови неправильного встановлення давачів. Також варто зауважити, що наявні дефекти деревини значно спотворюють результати акустичних вимірювань [11]. Зазначене вище дає змогу стверджувати низьку практичну цінність використання цього методу для системи керування процесом сушіння деревини.

Імпульсні акустичні методи аналізу напруженого стану краще адаптовані до практичного використання внаслідок відсутності потреби постійного стабільного контакту джерела сигналу та досліджуваної деревини [40]. Сучасні технічні зразки акселерометрів із значною швидкістю можна використати для отримання інформації про напружений стан деревини. Практичне застосування методу потребує виділення окремого бездефектного зразка деревини для контролю напруженого стану. Головною проблемою акустичних методів є висока вартість засобів аналізу акустичних сигналів та складність перетворення отриманих результатів у керівний чи коригувальний сигнал системи керування [7].

Застосування методу релаксації для дослідження напруженого стану деревини є перспективним способом контролю, оскільки він побудований із застосуванням промислового тензометричного давача. Наявність вбудованої компенсації температури і конструкція із нержавіючої сталі дає змогу отримати стабільний поточний сигнал технологічного контролю. Застосовувавши сучасний математичний апарат та наявні технічні засоби, можливо побудувати альтернативний спосіб прийняття рішень щодо зміни керованих параметрів у процесі сушіння або коригування в наявних системах. Основною проблемою, яку необхідно розв'язати, є побудова математичних залежностей щодо закономірностей розвитку полів напружень у висушуваних пиломатеріалах.

Застосування методу цифрової кореляції зображень (DIC) потребує значних витрат на проведення досліджень щодо встановлення взаємозв'язку між змінами у зображеннях висушуваної деревини та їх напруженим станом. Відсутність стійких до умов середовища засобів високоякісної оптичної фіксації зображень зводить використання цього методу тільки до лабораторних досліджень. Розроблення окремого давача, який можна було б застосувати безпосередньо у технологічному процесі, малоімовірний.

Використання методу ближньої інфрачервоної спектроскопії (NIRS), який виник зовсім недавно, виглядає доцільним для контролю напруженого стану тільки тонких деревинних матеріалів. Перспектива створення на його основі давача технологічного контролю незначна. Окрім цього, виникає потреба у великій кількості досліджень, які б описали зв'язок напруженого стану деревини із результатами NIRS-аналізу її поверхні.

За результатами аналізу сучасних систем керування процесом сушіння [13], з'ясовано, що основними входними величинами для прийняття рішень про зміну поточної фази режиму сушіння є давачі вологості деревини, встановлені згідно з рекомендаціями виробників. Також у деяких сушарках застосовують вагові давачі, які відстежують зменшення кількості вологи у висушуваних деревині.

Незважаючи на різноманітні технічні рішення щодо конструкції та застосованих режимів, керування процесом сушіння має на меті встановити певний рівень градієнта вологості між деревиною та зовнішнім середовищем, а також у самому перерізі деревини. Цього досягають за рахунок зміни керованих величин, таких як температура, вологість, швидкість та напрямок руху агента сушіння – для конвективних сушарок і температура деревини та вакуум метричний тиск – для вакуумних сушарок.

З наведеного вище можна зробити висновок про обмеженість інформації про стан деревини у процесі сушіння та відсутність альтернативних способів поточного контролю її стану. Це значно обмежує застосування результатів великої кількості теоретичних напрацювань [9, 35, 36] щодо ідентифікації напружено-деформованого стану деревини. Тому подальше дослідження закономірностей розвитку полів напружень у висушуваних пиломатеріалах потрібно здійснювати, враховуючи можливі технічні рішення щодо їх впровадження у реальні системи керування.

Порівнюючи між собою відомі методи практичного контролю напруженого стану деревини, варто взяти до уваги низьку критеріїв, за якими можна визначити перспективи їх застосування для побудови додаткових каналів керування чи коригування режиму її сушіння. Пропонуємо віднести до них:

- наявність стандартних давачів параметрів, які вже використовують або можна використати як інформаційний сигнал для керування процесом сушіння деревини;
- потребу попереднього виконання ручних дій перед початком застосування у технологічному процесі (для прикладу – встановлення давачів вологості на зразках);
- наявність стандартних технічних засобів, які дають змогу проводити апаратне перетворювання контрольованих величин у запропонованому методі;
- наявність стандартних програмних засобів для оброблення інформації, отриманої внаслідок застосування методу;
- наявність числових методів перетворення інформації у стандартизований вхідний сигнал системи керування;
- наявність аналітичних залежностей, які покладено в основу методу і можуть бути реалізовані стандартними технічними засобами;
- приблизна вартість імплементації.

Розглядаючи наведені вище методи практичного аналізу, за запропонованими критеріями можна передбачити подальші перспективи розвитку теоретичних і практичних досліджень закономірностей розвитку полів напружень у висушуваних пиломатеріалах. Для наочного порівняння у таблиці викладено результати узагальнення, які дають змогу оцінити стан поточних досліджень. Подана інформація дає змогу надалі аналогічно проаналізувати інші методи аналізу напруженого стану деревини, які можуть бути розроблені в перспективі з погляду можливості їх практичного застосування для систем автоматизації процесів сушіння деревини.

Дані таблиці доводять потребу в розробленні ефективних числових методів перетворення інформації для створення нової системи апаратно-програмних технічних засобів технологічного контролю напруженого стану деревини. За рахунок використання стандартних компонентів та максимально спрощеної конструкції потрібно забезпечити зручність використання у виробничих умовах та низьку вартість впровадження для наявних систем керування процесом сушіння.

Таблиця. Аналіз придатності наявних методів ідентифікації полів напружень у висушуваних пиломатеріалах для автоматизації процесу сушіння / Analysis of the suitability of existing methods for identifying stress fields in dried lumber for drying process automation

Критерій \ Метод	Метод силових секцій	Метод диференційної усадки	Метод акустичної емісії	Імпульсні акустичні методи	Метод релаксації	Метод цифрової кореляції зображень, DIC	Метод ближньої інфрачервоної спектроскопії, NIRS
Наявність стандартних датчиків параметрів	—	—	+	+	+	—	+
Потреба виконання ручних дій перед початком застосування у технологічному процесі	+	+	+	+	+	+	+
Наявність технічних засобів оперативного контролю параметрів	+	—	—	—	+	—	—
Наявність стандартних програмних засобів для оброблення інформації	+	+	—	—	—	—	—
Наявність числових методів перетворення інформації у стандартизований вхідний сигнал системи керування	—	—	—	—	—	—	+
Наявність аналітичних залежностей	+	+	—	—	+	—	—
Приблизна вартість імплементації	середня	середня	висока	висока	низька	дуже висока	дуже висока

Застосування пропонованого підходу до аналізу методів ідентифікації напруженого стану висушуваних пиломатеріалів дає змогу розробляти перспективні варіанти їх комбінування, проводити інтеграцію у них аналітичних залежностей і числових методів розрахунку для доповнення наявних автоматизованих систем керування додатковою інформацією про перебіг процесу сушіння деревини.

Обговорення результатів дослідження. У роботі [34] методом силових секцій досліджено напруження, що виникають у процесі сушіння деревини червоного дуба із використанням періодів нагрівання та охолодження, які чергуються. За підвищення температури деревина отримує тепловий удар, унаслідок чого сушіння відбувається тільки за рахунок градієнта вологості. Під час охолодження температура повітря знижується, ступінь насичення зростає і, відповідно, збільшується рівноважний вологовміст. Пінчевська і Спірочкін рекомендують розглядати процес кінетики зміни температури як суму процесів циклічного нагрівання, що відбувається за поліноміальною залежністю, та циклічного охолодження, що відбувається за експоненціальною залежністю із співвідношенням 1/3. Автори експериментально визначили показники залишкових напружень, величину перепаду напружень у заготовках після сушіння та значення межі міцності, які свідчать про можливість використання коливальних режимів сушіння для заготовок з деревини дуба червоного.

У роботі [42] автори досліджували розвиток внутрішніх напружень у молодих і зрілих зразках під час сушіння деревини каучуконосів. Автори розробили експериментальну систему онлайн-вимірювання сили, потрібної для утримання напіврозщепленого прямокутного зразка деревини. Зроблено практичний висновок про наявність чотирьох режимів розвитку напружень: нульовий, пришвидшення, реверсу та уповільнення. На першому з них вологість деревини все ще перевищує точку насичення волокон, при цьому усадка відсутня. На другому етапі ріст від'ємних значень напруження постійно пришвидшується. На третій стадії відбувається зміна знаку напружень. Цей режим відбувається в міру просування висушеної зони всередину і закінчується, коли не залишається жодної вологої зони. На четвертій стадії ріст додатних значень напруження сповільнюється, швидкість релаксації поступово зменшується і залишається на нульовому рівні до кінця сушіння.

У роботі [29] розглянуто метод акустичної емісії та його застосування у деревообробній промисловості. Автори порівнюють його із іншими методами неруйнівного контролю деревини, такі як інфрачервона спектроскопія, поширення хвилі напружень, направлене поширення звукових хвиль, рентгенівська комп'ютерна томографія і термографія. Аналізують концепцію та результати експериментів з акустичною емісією, а також обговорюють вплив властивостей деревини на швидкість та загасання звукових сигналів. Серед застосувань методу розглянуто процеси сушіння та контроль якості деревини. Обговорюють технічні можливості, які пропонує цей метод для технологічного моніторингу або інтелектуального оцінювання деревних матеріалів, а також критично окреслюють виклики і напрями майбутніх досліджень. Більшість пропонованих експериментальних досліджень зосереджені на вилученні простих часових характеристик сигналів, тоді як існує прогалина у використанні складних методів їх оброблення та практичного застосування у системах автоматичного керування процесом сушіння деревини.

У роботі [27] автори запропонували динамічну систему для експериментального випробування деревини сосни звичайної на деформацію за зміни температури та вологості з метою подальшого вивчення факторів релаксації напружень в різних умовах. Результати показали, що температура і вологість мають значний вплив на релаксацію напружень. З підвищенням температури або вмісту вологи напруження різко релаксують, а залишкові напруження швидко зменшуються. Встановлено, що початкові напруження зрілої деревини є більшими, ніж молоді, але швидкість релаксації напружень є меншою. Результати експериментальних досліджень показують, що для досліджуваних зразків, які перебували у стані поздовжнього розтягування, процес релаксації напружень можна поділити на дві частини: стрімке зниження напружень на початку та повільне зниження напружень упродовж тривалого часу. З підвищенням температури початкові напруження зменшуються, їх релаксація у деревині різко зростає, залишкові напруження швидко зменшуються; швидкість релаксації значно збільшується.

У роботі [1] наведено експериментальні дослідження механічних напружень зсуву для різних напрямків навантаження. Сили та кути зсуву було виміряно за до-

помогою експериментальної випробувальної машини та методу цифрової кореляції зображень. Автори експериментально дослідили деякі реологічні властивості та міцність деревини. Подано карти та діаграми кутів зсуву для критичних перерізів. Використання системи цифрової кореляції зображень показало, що вона здатна зібрати більше інформації про експеримент, ніж зазвичай використовували методи вимірювання, такі як тензOMETричні давачі. Графічне подання показало велику неоднорідність напружень на поверхні зразка у разі розподілу кутів зсуву. Встановлено значні відмінності отриманих параметрів для молодшої та зрілої деревини. Для аналізу поведінки деревини під час зсуву у випробуваннях на зсув використовували власну конструктивну модель аналізу дерев'яних конструкцій у двовісному плоскому напруженому стані, реалізовану в скінченно-елементному програмному комплексі. На експериментальне визначення поведінки завжди впливали труднощі в отриманні стану чистого та рівномірного зсуву в досліджуваних зразках.

У роботі [16] запропоновано стохастичний підхід для оцінювання механічної релаксації деревини. Спектральну матрицю інфрачервоного випромінювання конкретної породи деревини розглянуто як оператор, що становить фізичну величину статистичного ансамблю. Розподіл власних значень з матриці, на думку автора, дав не тільки вичерпну інформацію, пов'язану зі складною варіацією численних характеристик деревини, але й фізичну перспективу їх оцінювання на макро- або мікроскопічному рівнях деревини під час процесу навантаження у змінних термовологічних умовах.

У більшості наведених вище сучасних публікацій констатовано можливість використання низки відомих методів для дослідження напруженого стану висушуваних пиломатеріалів без формулювання критеріїв їх придатності до застосування у сучасних системах автоматичного керування процесом сушіння деревини. Зокрема в роботі [34], автори аналізують ефективність пропонуваного режиму сушіння дуба червоного відповідно до стандартної методики [10], не вказуючи в який спосіб здійснити його коригування за умови зміни параметрів сировини. Спосіб практичного вимірювання розвитку напружень у процесі сушіння деревини [42] придатний до практичного застосування, однак аналізуючи його за критеріями, викладеними у таблиці, ми бачимо відсутність числових методів перетворення інформації у стандартизований вхідний сигнал системи керування. Автори дослідження [29] роблять спробу аналізувати практичну придатність методу акустичної емісії, не застосовуючи жодних критеріїв, за якими його можна порівняти із іншими способами аналізу напружень у деревині. Результати роботи [27], на перший погляд, заслуговують впровадження в реальну систему керування, однак застосовуючи наші критерії оцінювання, легко встановити, які проблеми та обмеження властиві пропонуваному методу. Незважаючи на значну кількість експериментальних даних, методика їх отримання та запропоновані авторами [1] способи оброблення даних малоприменні до практичного застосування. У роботі [16] автор наводить потужний математичний апарат числового оброблення експериментальних досліджень методом ближньої інфрачервоної спектроскопії, не пропонуючи реального способу їх застосування у технологічному процесі сушіння деревини.

Отже, внаслідок виконаної роботи можна сформулювати такі наукову новизну та практичну значущість результатів дослідження.

Наукова новизна отриманих результатів дослідження – отримала подальший розвиток методика оцінювання придатності використання методів практичного аналізу полів напружень у висушуваних матеріалах для автоматизації технологічного процесу сушіння деревини, що, на відміну від наявних методик, дає змогу синтезувати нові апаратно-програмні засоби неперервного керування процесами сушіння деревини.

Практична значущість результатів досліджень – запропоновану методику можна використати для синтезу сучасної інтелектуальної системи керування сушінням деревини, яка дасть можливість удосконалити стратегію перебігу технологічного процесу висушування пиломатеріалів з урахуванням закономірностей розвитку в них полів напружень і, як наслідок, скорочення термінів сушіння, істотного зменшення енергоспоживання та підвищення якості отриманих виробів.

Висновки / Conclusions

Проаналізовано наявні практичні методи вимірювання та способи ідентифікації полів напружень у деревині, що дало змогу визначити їх придатність для практичного використання у технологічному процесі висушування пиломатеріалів. За результатами проведеного дослідження можна зробити такі висновки:

1. Аналізуючи сучасні літературні джерела, виявлено основні методи та технічні засоби, які використовують для аналізу полів напружень у висушуваних пиломатеріалах. Більшість із них можна використати тільки для контролю стану певних ділянок вибраних заготовок та дають наближений характер розподілу напружень без можливості оцінювання їх числового значення. Встановлено, що досі не існує прямих методів визначення напружень, що виникають у перерізі деревини у процесі її сушіння.
2. Розглянуті методи вдалося структурувати за параметрами, які вони дають змогу проаналізувати, та використовуваними технічними засобами за придатністю для технологічного контролю і керування процесом сушіння деревини. Також проаналізовано різновиди математичних моделей, які можуть стати основою побудови практичних методів оцінювання полів напружень. Встановлено факт неможливості застосування математичних залежностей, отриманих для однієї породи деревини, для аналізу інших порід. Визначено методи, технічне забезпечення яких може бути адаптоване для використання у реальних системах автоматичного керування процесами сушіння деревини.
3. Встановлено, що основним напрямом подальших досліджень є створення технічних засобів прямого вимірювання напружень у деревині. За умови їх інтеграції у систему автоматичного керування процесом сушіння можна отримати новий неперервний режим сушіння без застосування дискретних кроків-фаз зміни керованих параметрів. Однак здійснити це можливо за умови розроблення математичної моделі закономірностей розвитку полів напружень у висушуваних пиломатеріалах.

References

1. Bilko, P., Skoratko, A., Rutkiewicz, A., & Małyszko, L. (2021). Determination of the Shear Modulus of Pine Wood with the Arcan Test and Digital Image Correlation. *Materials*, 14(2), article ID 468. <https://doi.org/10.3390/ma14020468>
2. Borisov, V. M., & Kems, I. R. (2013). Pie chart of the state of moisture in wood and other hygroscopic porous materials. *Scientific*

- bulletin of UNFU, 23(10), 104–112. URL: https://nv.nltu.edu.ua/Archive/2013/23_10/104_Bor.pdf
3. Breese, M. C., Zhao, S., & McLeod, G. (1995) The use of acoustic emissions and steaming to reduce checking during the drying of European oak. *Holz als Roh- Und Werkstoff*, 53, 393–396. <https://doi.org/10.1007/s001070050116>
4. Chen, G., Keey, R. B., & Walker, J. C. F. (1997). The drying stress and check development on high-temperature kiln seasoning of sapwood *Pinus radiata* boards. *Holz Als Roh- Und Werkstoff*, 55(2-4), 59–64. <https://doi.org/10.1007/bf02990517>
5. Chen, G., Keey, R. B., & Walker, J. C. F. (1997). The drying stress and check development on high-temperature kiln seasoning of sapwood *Pinus radiata* boards. *Holz Als Roh- Und Werkstoff*, 55(2-4), 169–173. <https://doi.org/10.1007/bf02990539>
6. Cheng, W. L., Liu, Y. X., Shi Gang, M. L. (2007) Tensile stress relaxation of wood under high temperature and high pressure steam conditions. *Journal of Beijing Forestry University*, 29, 84–89. [In Chinese]. URL: https://www.researchgate.net/publication/289953316_Tensile_stress_relaxation_of_wood_under_high_temperature_and_pressurized_steam
7. Ciaburro, G., & Iannace, G. (2022). Machine-Learning-Based Methods for Acoustic Emission Testing: A Review. *Applied Sciences*, 12(20), article ID 10476. <https://doi.org/10.3390/app122010476>
8. Danihelová, Anna, & Viglasky, Jozef. (2004). The use of acoustic emissions to identify high levels of stress during wood drying. *Wood Research*, 49, 9–16. URL: https://www.researchgate.net/publication/288071829_The_use_of_acoustic_emissions_to_identify_high_levels_of_stress_during_wood_drying
9. Dendyuk, M. V., Pobereiko, B. P., & Sokolovsky, Y. I. (2002) Analysis of the stress-strain state and differential shrinkage during the regular mode of drying of dust materials. *Scientific bulletin of UNFU*, 12(8), 140–146. URL: https://nv.nltu.edu.ua/Archive/2002/12_8/28.pdf
10. DSTU 4921:2008. Sawn timber products. Assessment of drying quality. URL: https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page?id_doc=86996
11. Du, K., Wang, Y., Zhang, Z., Li, M., Fang, S., Huang, C., & Qin, G. (2024). Research on frequency-domain characteristics of acoustic emission signals generated during wood damage and fracture process. *Wood Material Science & Engineering*, 1–11. <https://doi.org/10.1080/17480272.2024.2429775>
12. Elustondo, D., Matan, N., Langrish, T., & Pang, S. (2023). Advances in wood drying research and development. *Drying Technology*, 41(6), 890–914. <https://doi.org/10.1080/07373937.2023.2205530>
13. Evseenko, O. M., Olshevsky, A. V., & Leshchenko, V. M. (2022). Automated control system for a batch drying chamber. *Technical engineering*, 2(90), 52–58. [https://doi.org/10.26642/ten-2022-2\(90\)-52-58](https://doi.org/10.26642/ten-2022-2(90)-52-58)
14. Fu, Z., Cai, Y., Zhao, J., & Huan, S. (2013). The Effect of Shrinkage Anisotropy on Tangential Rheological Properties of Asian White Birch Disks. *BioResources*, 8(4). URL: https://bioresources.cnr.ncsu.edu/BioRes_08/BioRes_08_4_5235_Fu_CZH_Effect_Shrinkage_Anisotropy_Tangential_Rheo_Wood_Disks_4458.pdf
15. Fu, Zongying, Cai, Yingchun, Zhao, Jingyao, & Huan, Siqi. (2013). The Effect of Shrinkage Anisotropy on Tangential Rheological Properties of Asian White Birch Disks. *BioResources*, 8(4), 5235–5243. <https://doi.org/10.15376/biores.8.4.5235-5243>
16. Fujimoto, T. (2021). Evaluation of stress relaxation process of wood based on the Eigen value distribution of near infrared spectra. *Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy*, 248, article ID 119197. <https://doi.org/10.1016/j.saa.2020.119197>
17. Gao, Y., Fu, Z., Zhou, Y., Gao, X., Zhou, F., & Cao, H. (2022). Moisture-Related Shrinkage Behavior of Wood at Macroscale and Cellular Level. *Polymers*, 14(22), article ID 5045. <https://doi.org/10.3390/polym14225045>
18. Glass, S. V., & Zelinka, S. L. (2010). Moisture relations and physical properties of wood. *Wood handbook: wood as an engineering material*: chapter 4. Centennial ed. General technical report FPL; GTR-190. Madison, WI: U. S. Dept. of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory, 4.1–4.19. URL: <https://research.fs.usda.gov/treesearch/37428>
19. Grottesi, G., Coelho, G. B. A., & Kraniotis, D. (2023). Heat and Moisture Induced Stress and Strain in Wooden Artefacts and Elements in Heritage Buildings: A Review. *Applied Sciences*, 13(12), article ID 7251. <https://doi.org/10.3390/app13127251>
20. Han, Y., Park, Y., Park, J. H., Yang, S. Y., Eom, C. D., & Yeo, H. (2016). The shrinkage properties of red pine wood assessed by image analysis and near-infrared spectroscopy. *Drying Technology*, 34(13), 1613–1620. <https://doi.org/10.1080/07373937.2016.1138964>
21. Huang, C., Gong, M., Chui, Y., & Chan, F. (2020). Mechanical behaviour of wood compressed in radial direction-part I. New method of determining the yield stress of wood on the stress-strain curve. *Journal of bioresources and bioproducts*, 5(3), 186–195. <https://doi.org/10.1016/j.jobab.2020.07.004>
22. Jaskowska-Lemańska, J., & Przesmycka, E. (2021). Semi-Destructive and Non-Destructive Tests of Timber Structure of Various Moisture Contents. *Materials*, 14(1), 96. <https://doi.org/10.3390/ma14010096>
23. Kang, H. Y., Muszyński, L., & Milota, M. R. (2011). Optical Measurement of Deformations in Drying Lumber. *Drying Technology*, 29(2), 127–134. <https://doi.org/10.1080/07373937.2010.482725>
24. Landis, E. N., & Belalpour Destjerdi, P. (2022). Acoustic Emissions in Wood. In: Grosse, C. U., Ohtsu, M., Aggelis, D. G., Shiotani, T. (Eds). *Acoustic Emission Testing*. Springer Tracts in Civil Engineering. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-030-67936-1_19
25. Landis, Eric, & Belalpour Dastjerdi, Parinaz. (2021). Acoustic Emissions in Wood. https://doi.org/10.1007/978-3-030-67936-1_19
26. Larsen, F., Ormarsson, S. (2013). Numerical and experimental study of moisture-induced stress and strain field developments in timber logs. *Wood Sci Technol*, 47, 837–852. <https://doi.org/10.1007/s00226-013-0541-z>
27. Li, X. Q., Wang, X. M., & Yu, J. F. (2011). Research on Tensile Stress Relaxation Characteristics of *Pinus sylvestris*. *Materials Science Forum*, 704–705, 480–485. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/msf.704-705.480>
28. Mcmillen, J. M. (1955). Drying stress in red oak. *Forest Products Journal*, 5(1), 71–76. URL: <http://kb.forestprod.org/Main/ind/?id=70523>
29. Nasir, V., Ayanleye, S., Kazemirad, S., Sassani, F., & Adamopoulos, S. (2022). Acoustic emission monitoring of wood materials and timber structures: A critical review. *Construction and Building Materials*, 350, article ID 128877. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.128877>
30. Nasir, V., Nourian, S., Avramidis, S., & Cool, J. (2019). Stress wave evaluation for predicting the properties of thermally modified wood using neuro-fuzzy and neural network modeling. *Holzforschung*, 73(9), 827–838. <https://doi.org/10.1515/hf-2018-0289>
31. Nasir, V., Nourian, S., Avramidis, S., et al. (2019). Stress wave evaluation by accelerometer and acoustic emission sensor for thermally modified wood classification using three types of neural networks. *European Journal of Wood and Wood Products*, 77, 45–55. <https://doi.org/10.1007/s00107-018-1373-1>
32. Ormarsson, S., Dahlblom, O., & Johansson, M. (2009). Finite element study of growth stress formation in wood and related distortion of sawn timber. *Wood Sci Technol*, 43, 387–403. <https://doi.org/10.1007/s00226-008-0209-2>
33. Pinchevska, O. O. (2007). Substantiation of requirements for assessing the quality of drying of dust materials. *Scientific bulletin of UNFU*, 17(2), 42–48. URL: https://nv.nltu.edu.ua/Archive/2007/17_2/42_Pinczewska_17_2.pdf
34. Pinchevska, O., & Spirochkin, A. (2021). Pulse drying of red oak wood blanks. *Ukrainian Journal of Forest and Wood Science*, 12(2), 40–49. <https://doi.org/10.31548/forest2021.02.004>

35. Pobereiko, B. P., & Flood, L. O. (2014). Influence of geometric dimensions on the permissible moisture drop and distribution of stress fields for coniferous dust materials. *Scientific bulletin of UNFU*, 24(5), 329–332. URL: https://nv.nltu.edu.ua/Archive/2014/24_5/54.pdf
36. Pobereiko, B. P., & Sokolovskyi, Y. I. (2002). Influence of wood anisotropy on the dependence of differential shrinkage on stress-strain state in dried dust materials. *Scientific bulletin of UNFU*, 12(5), 162–166. URL: https://nv.nltu.edu.ua/Archive/2002/12_5/45.pdf
37. Rice, R. W., & Youngs, R. L. (1990). The mechanism and development of creep during drying of red oak. *Holz als Roh- und Werkstoff*, 48, 73–79. <https://doi.org/10.1007/BF02610711>
38. Simpson, W. T. (1991). Dry kiln operators manual. In *Agriculture Handbook*, U. S. Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory: Madison, WI, USA. URL: https://www.tropicaltimber.info/wp-content/uploads/2015/09/US-DA.FPL_AH188.Rev1991DryKilnOperatorsManual.pdf
39. Skaar, C., Simpson, W. T., & Honeycutt, R. M. (1980). Use of acoustic emissions to identify high levels of stress during oak lumber drying. *Forest Products Journal*, 30, 21–22. URL: <https://www.cabidigitallibrary.org/doi/full/10.5555/19800662406>
40. Sokolovskyi, Y. I., Safarov, V. O., & Storozhuk, O. L. (2005) Investigation of thermophysical and elastic properties of wood by ultrasonic method. *Scientific bulletin of UNFU*, 15(4), 124–133. URL: https://scholar.google.com.ua/citations?view_op=view_citation&hl=uk&user=V-WInIAAAAJ&citation_for_view=V-WInIAAAAJ:xSYboBqXhAC
41. Stöhr, H. P. (1988) Shrinkage differential as a measure for drying stress determination. *Wood Science and Technology*, 22, 121–128. <https://doi.org/10.1007/BF00355848>
42. Tomad, J., Leelatanon, S., Jantawee, S., Srisuchart, K., & Matan, N. (2022). Internal stress development within wood during drying: regime and kinetics. *Drying Technology*, 41(1), 77–88. <https://doi.org/10.1080/07373937.2022.2084750>
43. Tsuchikawa, S., Hayashi, K., & Tsutsumi, S. (1996). Nondestructive Measurement of the Subsurface Structure of Biological Material Having Cellular Structure by Using Near-Infrared Spectroscopy. *Applied Spectroscopy*, 50(9), 1117–1124. <https://doi.org/10.1366/0003702963905114>
44. Wang, H. H., & Youngs, R. L. (1996). Drying Stress and Check Development in the Wood of two Oaks. *IAWA Journal*, 17(1), 15–30. <https://doi.org/10.1163/22941932-90000619>
45. Watanabe, K., Kobayashi, I., Saito, S., et al. (2013). Nondestructive evaluation of drying stress level on wood surface using near-infrared spectroscopy. *Wood Science and Technology*, 47, 299–315. <https://doi.org/10.1007/s00226-012-0492-9>
46. Yang, S. Y., Han, Y., Chang, Y. S., Kim, K. M., Choi, I. G., & Yeo, H. (2013). Moisture Content Prediction Below and Above Fiber Saturation Point by Partial Least Squares Regression Analysis on Near Infrared Absorption Spectra of Korean Pine. *Wood Fiber Science*, 45, 415–422. URL: <https://wfs.swst.org/index.php/wfs/article/view/1851>
47. Yankov, E., & Deliiski, N. (2007, July). Programmable Control for Lumber Drying in Chambers. In *Proceedings of the 11th WSEAS International Conference on SYSTEMS*, Agios Nikolaos, Crete, Greece, 194–198. URL: https://www.researchgate.net/profile/Nencho-Deliiski/publication/237204454_Programmable_Control_for_Lumber_Drying_in_Chambers/links/552bfd770cf21acb091f56dc/Programmable-Control-for-Lumber-Drying-in-Chambers.pdf
48. Zhou, F., Fu, Z., Zhou, Y., Zhao, J., Gao, X., & Jiang, J. (2019). Moisture transfer and stress development during high-temperature drying of Chinese fir. *Drying Technology*, 38(4), 545–554. <https://doi.org/10.1080/07373937.2019.1588900>

R. R. Kurka, B. P. Pobereiko

National Forestry University of Ukraine, Lviv, Ukraine

SUITABILITY OF EXISTING METHODS FOR IDENTIFYING STRESS FIELDS IN LUMBER FOR AUTOMATED WOOD DRYING CONTROL SYSTEMS

Despite the significant development of computing power, the availability of a significant number of theoretical developments and the results of numerical experiments, the practical determination of the stress state of wood during drying still remains a difficult technical task. In the course of research, it has been found that in a significant number of published scientific studies, the authors try to relate the moisture distribution in dried lumber to the distribution of stresses and strains using known techniques and tools. It has been established that most modern drying process control systems use only the parameters of humidity and temperature of wood and the environment as input signals without taking into account information about the current distribution of stresses occurring in the cross-section of dried lumber. It has been shown that assessing the quality of the drying process by the final result does not allow us to determine whether all stages of the drying regime satisfy the requirement of preserving the integrity of wood. Accordingly, as a result of making incorrect decisions regarding the intensity of moisture removal, its duration increases and overall energy consumption increases as well. The need to supplement the existing automatic control systems with additional information on the development of stresses in wood during drying is proved, which can not only significantly improve the quality and economic indicators, but also radically change the strategy of the process itself. The applicability of the available means of identifying stress fields in dried lumber is analyzed and the main criteria for their comparison in terms of practical use are formulated. The absence of direct methods for measuring the distribution of stresses arising in the process of wood drying was revealed. The limitations of the available technical means and mathematical models for use in automation systems for the wood drying process are determined. The need to develop a direct method for assessing the stress-strain state of wood has been established. The expediency of developing a mathematical model of the regularities of the development of stress fields in dried lumber to improve existing dryer control systems is substantiated.

Keywords: cutting sections; differential shrinkage; acoustic emission; pulsed acoustic emission; digital image correlation; near-infrared spectrometry.