

ДОСЛІДЖЕННЯ ФАЗОВОГО СТАНУ ВОЛОГИ В ДЕРЕВИНІ ДІЕЛЬКОМЕТРИЧНИМ ІМПУЛЬСНИМ МЕТОДОМ

Розглянуто принцип дії розробленого авторами дієлькометричного імпульсного методу (ДІМ). Описано окремі результати дослідження цим методом фазового стану вологи в деревині, показано значення отриманих результатів для вирішення нагальних проблем деревинознавства. Зокрема визначено межу мікрокапілярної вологи та її залежність від температури в діапазоні 10-90 °С, розраховано кількості адсорбованої та мікрокапілярної вологи на межі гігроскопічності. Описано основні напрями застосування і перспективи розвитку технічних засобів і технології з використанням ДІМ.

Ключові слова: деревина; вільна, зв'язана, адсорбована та мікро-капілярна во-
лога, поляризація.

Вода – основа життя і найпоширеніша речовина на поверхні нашої планети, що значною мірою визначає її клімат. Цими важливими ролями на Землі вода зобов'язана своїй мінливості, багатству структурних форм, унікальності властивостей і чутливості до умов середовища. Про різноманіття властивостей води свідчить наявність у неї 12 структур льоду і 18 фазових переходів. Багато властивостей води є винятковими: теплота пароутворення, поверхневий натяг, діелектрична проникність, здатність розчиняти... Властивості води досі є важливим предметом наукових досліджень національних та міжнародних установ.

Усі речовини, усі тіла на Землі взаємодіють з водою. "Нет земного вещества, минерала, горной породы, живого тела, которое бы её не включало" (академ. Вернадський). Складність та інтенсивність відрізняється взаємодія води з пористими тілами, до яких належить деревина. Їх загальною властивістю є розвинена "внутрішня" поверхня, на якій проявляються особливості взаємодії твердого тіла з рідиною та газом. Вода не тільки просочує тверді тіла, але і внаслідок взаємодії змінює як їх, так і свої властивості. Вивчення взаємодії води з гігроскопічною деревиною, що має складну багаторівневу пористу будову і виражену залежність параметрів від умов середовища, особливо актуальне, враховуючи широкий діапазон температур і вологості її використання як екологічного конструкційного матеріалу.

Особливість дослідження взаємодії води з деревиною полягає у необхідності вивчення чутливих до зовнішніх впливів процесів у середині твердого тіла. Через складності постановки дослідів питання взаємодії досліджують більше теоретично, ніж експериментально. Нестача достовірних експериментальних даних призводить до одночасного існування великої кількості гіпотез, що впливають з різних теоретичних припущень. Наводимо нові експериментальні результати дослідження фазового стану води в деревині і подано деякі теоретичні оцінки.

У 1951 р. Takeda, а в 1956 р. Windle і Shaw за допомогою дієлькометричних вимірювань встановили, що вода в деревині може перебувати одночасно в трьох фазових станах, присутність яких залежить від рівня вологості

[1]. Пізніше методами ЯМР було підтверджено наявність в деревині фази твердої і двох фаз рідкої вологи: зв'язаної, за вологості деревини в межах 5-20 %, та вільної, за вологості деревини більше 20 %. Ці два методи використовують і зараз для досліджень стану вологи в деревині. Відомі методи потребують застосування спеціального коштовного обладнання, мають малу чутливість, а робота з ЯМР пов'язана ще і з застосуванням дорогих та радіоактивних препаратів.

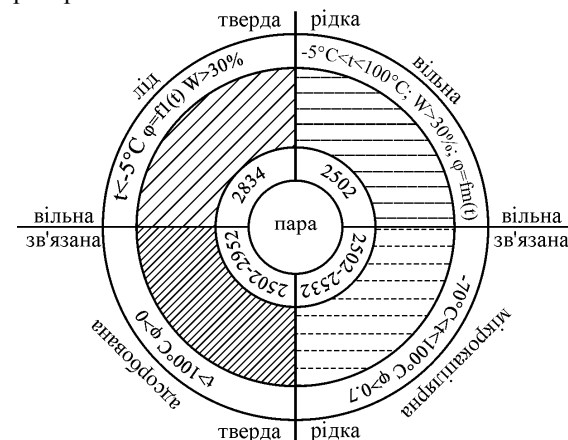


Рис 1. Кругова діаграма фаз води в деревині

Контроль фазового складу води в деревині у технологічних процесах не проводиться через відсутність відповідних методик та доступних технічних засобів контролю. Визначення на основі перевірених експериментальних даних кількісних відношень окремих фаз вологи в деревині істотно уточнює та доповнює встановлені факти і має велике значення для розвитку теорії сорбції. Розроблений метод визначення фазового стану вологи придатний не тільки для дослідження в лабораторних умовах, але може бути використаний у технологічних приладах.

Для ілюстрації стану та взаємного зв'язку різних фаз вологи в деревині ми пропонуємо кругову діаграму, один з варіантів якої зображено на рис. 1. В основі діаграми лежать два концентричних кола. Більше коло розділене вертикальною лінією на зони, що умовно зображають твердий та рідкий агрегатний стан вологи, а горизонтальною лінією на зони вільної та зв'язаної вологи. Кожна з цих чотирьох зон конденсованих фаз води граничить з центральною зоною, що меншим колом зображає газоподібний агрегатний стан води в деревині – пару. У заданих умовах кожна конденсована фаза води має своє значення рівноважного тиску пари. Тиск пари за рівноважного розподілу вологи є спільним для усіх одночасно існуючих форм води в деревині. На зовнішньому інформаційному кільці вказано умови існування кожної конденсованої фази. Якщо до встановлення стаціонарного розподілу вологи тиск пари виявиться меншим за рівноважну для якоїсь з концентрованих фаз, то під час встановлення рівноваги кількість вологи цієї фази буде зменшуватись за ра-

хунок випаровування, а за протилежної умови – збільшуватись за рахунок конденсації пари. Залежність рівноважного тиску пари зв'язаної води від її вмісту в деревині призводить до встановлення нового стану рівноваги.

Особливістю води є можливість переходу з будь-якої конденсованої фази в пару з поглинанням кількості енергії, яка вказана на внутрішньому інформаційному кільці у секторі кожної фази в джоулях на грам. Пара так само може перетворюватись у кожну конденсовану фазу з виділенням вказаної кількості енергії. Зважаючи на велику рухомість пари та різницю парціальних тисків над різними фазами, наведена діаграма демонструє можливі механізми процесів тепломасоперенесення в деревині.

Перехід води з однієї концентрованої фази в іншу відбувається згідно з витратами енергії так, ніби послідовно відбулося два переходи: вихідної фази у пару та пари у кінцеву фазу. Тобто внаслідок такого переходу буде виділятися або поглинатися енергія у кількості, що дорівнює різниці енергій пароутворення та конденсації відповідних фаз.

Загальна кількість фазових переходів води у деревині дорівнює десяти, в кожному з них може відбуватися перетворення фазового стану у двох напрямках. Таким чином, у деревині можна виділити 20 процесів, пов'язаних зі зміною фазових станів води. Одночасно можуть відбуватися декілька процесів, наприклад, перехід вільної води в адсорбовану, мікрокапілярну та пару. Вивчення цих процесів потребує засобів контролю кількості води у кожній фазі.

Якщо для заданої температури енергія пароутворення з вільної поверхні води становить фіксовану величину, то для зв'язаної води ця величина є ще й функцією вологості деревини і може змінюватись від максимального значення для сухої деревини до рівня енергії пароутворення з вільної поверхні води для вологої деревини на границі гігроскопічності. Відомі методи дослідження фазового стану води в деревині, дієлометричний та ЯМР, завдяки різниці сили (енергії) зв'язків з твердою речовиною (не тільки з деревиною) дають змогу визначити наявність різних фаз води. Безперервні методи ЯМР та дієлометричний метод визначають силу зв'язків за величиною коливань ядер водню та молекул води під дією зовнішніх сил відповідно. Імпульсні методи ЯМР визначають силу зв'язків за часом повернення речовини до рівноважного стану після імпульсного збудження. Розроблений імпульсний дієлометричний метод (ДІМ) оцінює ступінь зв'язків води з твердою речовиною за часом переорієнтації молекул води за зміни напруженості зовнішнього електричного поля, тобто за тривалістю процесу поляризації. Чим сильніший зв'язок води з твердою речовиною, тим менше у молекул води можливостей переорієнтації, і тим менше часу займає процес поляризації і навпаки. Відповідно до ДІМ, на зразок накладається електричне поле, величина якого змінюється стрибком, а струми поляризації зразка розкладаються на складові, відповідні різним фазам води за значенням сталої часу.

На перших етапах досліджень визначення параметрів складових струмів поляризації доцільно виконувати за допомогою програмних засобів, що забезпечує оптимальні умови для гнучкого підбору алгоритмів, максимальну

точність та швидкість обчислень. Для аналізу отриманих в експериментах за ДІМ результатів було підготовлено вимірювальну систему, що включає спеціально розроблені давачі та інші електронні модулі, вимірювальні прилади, програми реєстрації струмів поляризації, а також програму виділення складових струмів поляризації, яка працює у середовищі Matlab. З набуттям досвіду використання програми і виокремленням набору бажаних для ефективного застосування ДІМ параметрів системи можливо об'єднання необхідних модулів у єдиному спеціалізованому автономному приладі.

ДІМ можна розглядати як узагальнений комплексний електричний спосіб діагностики стану води в деревині. Цим способом визначаються величина струму наскрізної провідності матеріалу, як у кондукторних методах, та ємнісний струм, як у дієлометричних методах. Але, крім того, ємнісні струми поляризації аналізують за методом максимальної ентропії (МЕМ), як у методі імпульсного ЯМР, на складові за ознакою величини сталої часу на струми деревини й адсорбованої води (дуже малі значення сталої часу $\tau_a < 5$ мкс), мікрокапілярної води ($50 < \tau_{mk} < 200$ мкс) та вільної води ($1000 < \tau_v < 2500$ мкс, усі сталі вказані для $t = 15-28^\circ\text{C}$) і визначити амплітуди струмів цих складових. Чутливість методу дає змогу виявити зміни кожної фази води величиною у відсотку. Ці можливості були випробувані під час спостереження процесів, що відбуваються під час намочування деревини і розповсюдження по ній води.

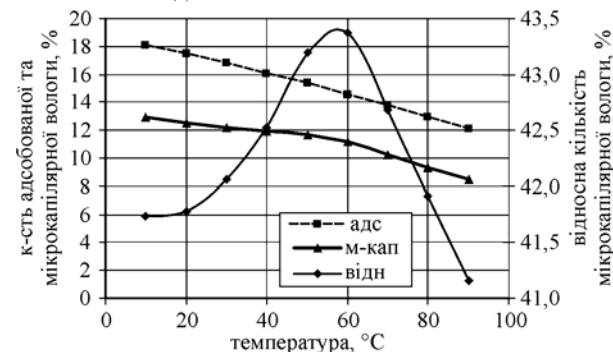


Рис. 2. Залежність кількості адсорбованої, мікрокапілярної води від частки мікрокапілярної на межі гігроскопічності

Саме висока чутливість ДІМ і здатність розрізняти фази води були використані для встановлення границі мікрокапілярної води. Експериментально за допомогою ДІМ було доведено, що перегин залежності величини усушки від кінцевої вологості [2] викликаний зникненням у деревині за вологості меншої за 15 % мікрокапілярної води. Аналіз відповідних перегинів ізотерм сорбції, отриманих з діаграми рівноважної вологості [3], призводить до аналітичних виразів, що відображають кількість адсорбованої та мікрокапілярної води залежно від температури і загальної вологості деревини. На підставі аналізу цих виразів було виявлено функціональну залежність умовної границі капілярної вологості (УГ) та отримано аналітичний вираз залеж-

ності її від температури. На рис. 2 у графічному виді подано залежність кількості адсорбованої, мікрокапілярної вологи та відсотка мікрокапілярної на межі гігроскопічності. Причина розбіжності отриманих експериментальних даних із розрахованою Чудіновим кількістю мікрокапілярної вологи полягає у помилковості його припущення, за яким у деревині вологістю 15 % мікрокапілярної вологи не може бути [1].

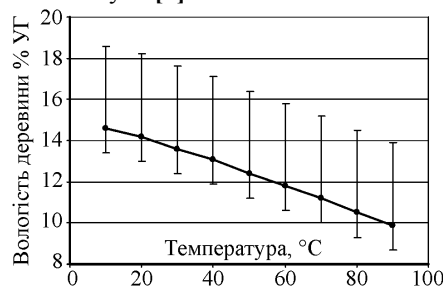


Рис. 3. Вологість деревини на УГ і положення перехідної зони

У досліджуваному діапазоні температур умовна границя мікрокапілярної вологи (УГ) знаходиться в межах $79^{\pm 0,7}$ % відносної вологості повітря, яка зі зростанням температури збільшується. Відповідна вологість деревини знаходиться в межах $12,25^{\pm 2,4}$ % і зі зростанням температури знижується, як показано на рис. 3. Перехідна зона, виділена вертикальними рисками, відповідає діапазону вологості деревини, в якому залежність кількості мікрокапілярної вологи нелінійно залежить від вологості повітря. Нижче перехідної зони мікрокапілярна волога в деревині практично не міститься.

Використання ДІМ дає змогу знайти відповіді на за питання чи відкрити нові можливості та перспективи досліджень. Так, наприклад, багато авторів, зокрема Б.С. Чудінов, наголошують на тому, що максимальна кількість адсорбованої та мікрокапілярної вологи міститься в деревині на границі гігроскопічності, а за умови вищого значення вологості деревини ця кількість залишається практично незмінною. Результати спостереження за фазами вологи в деревині за допомогою ДІМ спростовують це положення.

На рис. 4 наведено залежності величини амплітуд складових струму поляризації деревини бука від його вологовмісту. Наведені залежності показують значне зростання струму мікрокапілярної складової внаслідок збільшення вологості у понад 30 %. За умови незмінного значення постійної часу струму поляризації, його амплітуда пропорційна кількості вологи у відповідній фазі. Це впливає із загальних властивостей поляризації. У цьому випадку таку пропорцію можна використати як перше наближення. Можливість уточнення кількості вологи у кожній фазі за умови змін сталої часу поляризації зараз досліджується.

На верхньому графіку рис. 4 подано складові струмів поляризації у діапазоні 14-91,6 % вологості деревини у повздовжньому напрямку. На ньому позначені: $I_{\text{скр пров}}$ – струм наскрізної провідності; $I_{\text{емніст}}$ – емнісний струм; $I_{\text{вільної}}$ – струм вільної вологи; $I_{\text{м-капіл}}$ – струм мікрокапілярної вологи. Максималь-

не зображене на цьому графіку значення мікрокапілярного струму за 91,6 % вологості становить 258 мкА. Границю гігроскопічності на нижньому графіку добре помітно за точкою перегибу графіка струму вільної вологи близько 34 % вологості деревини. Для цієї вологості мікрокапілярний струм становить 2,1 мкА, що у 123 рази менше, ніж за вологості 91,6 %. Рівень шумів у цьому дослідженні добре помітний на значно нижчому рівні, близько 0,23 мкА, якого мікрокапілярний струм досягає за вологості деревини приблизно 14 %, а складова вільної вологи – за вологості 34 %.

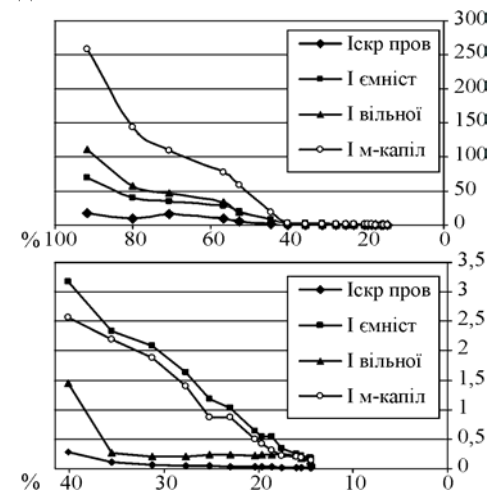


Рис. 4. Складові струмів поляризації деревини

Значне зростання кількості мікрокапілярної вологи з ростом кількості вільної можна пояснити утворенням частково зв'язаної деревиною вологи не тільки на обмеженій поверхні мікрокапілярів, але і на всій внутрішній поверхні клітинних стінок. Там шар рідини на поверхні деревної речовини набуває властивостей мікрокапілярної вологи. Поки ще незрозуміло, чи збільшується так само кількість адсорбованої вологи. Отримані відомості дасть змогу уточнити окремі положення теорії сорбції. Дослідження за допомогою ДІМ кількісних відношень фаз вологи в деревині тільки почалася. Результати виконаних експериментів дали змогу виділити питання та відомості для підготовки наступних більш досконалих досліджень.

Відносні рівні емнісних струмів та струмів наскрізної провідності (рис. 4) визначають доцільність впровадження кондукторних чи діелектричних методів вимірювання у різних діапазонах вологості. За отриманими результатами можна розрахувати величини струмів для заданих конструкцій давачів за різних режимів роботи вологомірів, і за величиною цих струмів провести оптимізацію методів, конструкцій та режимів роботи вологомірів.

Нову характеристику вологовмісту деревини, яку визначає ДІМ – стала часу поляризації вологи, ще досконало не досліджено. Але за результатами вже проведених експериментів відомо про її залежність від температури

та напружень в матеріалі. Вивчення цих залежностей може сприяти розвитку методів контролю температур і внутрішніх напружень у середині зразка деревини. Зауважимо вплив навантаження на сталу часу поляризації вологи зразка, як показника інтенсивності взаємодії води і деревини, може пояснити залежність швидкості сушіння від механічних напружень [4]. У сукупності ці явища логічно пояснюють гістерезис сорбції. Докладніше вивчення цих питань методами ДІМ потребує розробки спеціальних експериментів. Результати проведених досліджень показали, що зміни сталих часу поляризації вологи у різних напрямках під час сушіння зразка мають істотні особливості. Це свідчить про можливість вивчення структурних аспектів будови деревини за допомогою ДІМ.

Чудінов Б.С. дійшов до висновку про можливість появи вільної вологи в деревині, внаслідок конденсації її з пари у капілярах розміром більш за 100 нм. Але цей розмір капіляра було обрано як граничний, виходячи не з властивостей води в деревині. Чи набуває частина гігроскопічної вологи властивостей вільної води має відповісти експеримент, який готується зараз до проведення. Важливим, цікавим, але поки що не здійсненим залишається розділення струмів адсорбційної вологи та деревинної речовини. Вирішення такої задачі дасть змогу отримати кількісну оцінку адсорбованої фази вологи та щільності деревини. Така оцінка дала б змогу компонувати штабелі пилопродукції за критерієм рівності енергетичних витрат і режиму сушіння. Принципово алгоритм отримання таких результатів розроблено, але для експериментальної перевірки досяжної точності необхідний час на підготовку та проведення численних вимірювань і досліджень різних порід деревини.

Для використання позитивних властивостей ДІМ у технологічних процесах необхідно вирішити конструктивні та технологічні питання, починаючи з розробки спеціалізованих приладів, програми та методики їх перевірки, методики оцінювання стану вологи в деревині, визначення кількості кожної фази вологи за параметрами струмів поляризації і до створення нових технологій гідротермооброблення деревини. Для наукових досліджень використання ДІМ дає змогу провести нові експерименти та уточнити положення.

Література

1. Колосовская Е.А. Физические основы взаимодействия древесины с водой / Е.А. Колосовская, С.Р. Лоскутов, Б.С. Чудінов. – Новосибирск : Изд-во "Наука". Сиб. отд-ние, 1989, – 216 с.
2. ГОСТ 6782.1-75. Пилопродукция из древесины хвойных пород. Величина усушки.
3. Серговский П.С. Гидротермическая обработка и консервирование древесины / П.С. Серговский. – М. : Изд-во "Лесн. пром-сть", 1975.
4. Борисов В.М. Экспериментальная проверка зависимости электричного опоры та втрат вологи від механічних напружень у процесі сушіння деревини / В.М. Борисов, І.Р. Кенс, Б.П. Поберейко // Науковий вісник НЛТУ України : зб. наук.-техн. праць. – Львів : РВВ НЛТУ України. – 2012. – Вип. 22.5. – С. 129-138.

Борисов В.М., Кенс И.Р. Исследование фазового состояния влаги в древесине диэлькометрическим импульсным методом

Рассмотрен принцип действия разработанного авторами диэлькометрического импульсного метода (ДИМ). Описаны отдельные результаты исследования этим ме-

тодом состояния влаги в древесине, показано значение полученных результатов для решения неотложных проблем древоведения. В частности, определена граница микрокапиллярной влаги и ее зависимость от температуры в диапазоне 10-90 °С, рассчитано количество адсорбированной и микрокапиллярной влаги на границе гигроскопичности. Описаны основные направления применения и перспективы развития технических средств и технологии с использованием ДИМ.

Ключевые слова: древесина; свободная, связанная, адсорбированная и микрокапиллярная влага, поляризация.

Borisov V.M., Kens I.R. Study of phase of moisture in the timber by the pulse dielectric method

This article describes the principle of operation developed by the authors dielectric pulse method (DPM), some results of the research with DPM the state of moisture in wood, shows the importance of the results for the solution of urgent problems of wood science. Specifically defined boundary microcapillary moisture and its dependence on temperature in the range 10-90 °C, the calculated amount of adsorbed and microcapillary moisture for border hygroscopicity. shows the basic directions of application and prospects of technical means and technologies using DPM.

Keywords: wood; free, bound, adsorbed and micro-capillary moisture, polarization.

УДК 536.8:621.1

Доц. О.С. Мачуга, канд. фіз.-мат. наук;

студ. В.В. Драбик; студ. М.М. Панасюк – НЛТУ України, м. Львів

ДОСЛІДЖЕННЯ ОСОБЛИВОСТЕЙ РОБОТИ ДІЮЧОЇ МОДЕЛІ ДВИГУНА СТІРЛІНГА

Використання енергії відновних джерел для потреб лісозаготівлі пов'язане з необхідністю перетворення теплової енергії від спалення відходів деревини в механічну. Вирішення такого завдання можливе зокрема за умови використання теплової машини – двигуна Стірлінга. Подано результати експериментальних досліджень режимів роботи та визначення деяких параметрів моделі такого двигуна. Ці результати можна надалі використовувати під час розроблення та впровадження енергетичних комплексів, пов'язаних із відновними джерелами.

Ключові слова: енергія відновних джерел, двигун Стірлінга, експеримент.

Вступ. Ефективне використання енергії відновних джерел передбачає споживання її не тільки у вигляді тепла для опалювання виробничих та житлових приміщень, але і як засіб забезпечення механічною енергією машин та обладнання, зокрема у лісовій промисловості [1]. Це зможе привести як до покращення екологічного стану довкілля, так і до здешевлення продукції, оскільки актуальні енергетичні засоби з невідновних джерел – рідкі палива та електроенергія, добуті шляхом спалення вугілля чи природного газу, перероблення нафти або внаслідок ядерної реакції – частково або повністю можна замінити енергетичними засобами відновних джерел: біомаса (відходи лісозаготівлі та лісоперероблення) та гідроресурси малих річок [2, 3]. Один із напрямів перетворення теплової енергії згоряння біомаси в механічну енергію – використання теплових машин, пов'язаних із термодинамічним циклом Стірлінга.

Основний виклад. Об'єкт дослідження – діюча модель двигуна Стірлінга акустичного типу (рис. 1).