

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ПОЛІСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Факультет лісового господарства та екології
Кафедра лісового та садово-паркового господарства
Кваліфікаційна робота
на правах рукопису

МОСЕЙЧУК ВАДИМ ВАЛЕРІЙОВИЧ

УДК 684.4.04

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

ДОСЛІДЖЕННЯ КІНЕТИКИ СУШІННЯ ТА ГІДРАТАЦІЇ
ТЕРМОМОДИФІКОВАНОЇ ДЕРЕВИНИ СОСНИ

205 «Лісове господарство»

Подається на здобуття освітнього ступеня «Магістр»
кваліфікаційна робота містить результати власних наукових досліджень.
Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на
відповідне джерело

_____ Мосейчук В.В.

Керівник роботи
Кульман Сергій Миколайович
кандидат техн. наук, доцент

Житомир – 2024

Висновок кафедри лісового та садово-паркового господарства

за результатами попереднього захисту: _____

Протокол засідання кафедри лісового та садово-паркового господарства

№ __8__ від «_03_» ____12____ 2024 р.

Завідувач кафедри лісового та садово-паркового господарства

к.с.-г. н., доцент _____ Сірук Юрій Вікторович

«_03_» ____12____ 2024 р.

Результати захисту кваліфікаційної роботи

Здобувач вищої освіти МОСЕЙЧУК ВАДИМ ВАЛЕРІЙОВИЧ захистив
кваліфікаційну роботу з оцінкою:

сума балів за 100-бальною шкалою _____

за шкалою ECTS _____

за національною шкалою _____

Секретар ЕК

АНОТАЦІЯ

Мосейчук В.В. Дослідження кінетики сушіння та гідратації термомодифікованої деревини сосни. – Кваліфікаційна робота на правах рукопису.

Кваліфікаційна робота на здобуття освітнього ступеня магістра за спеціальністю 205 – лісове господарство. – Поліський національний університет, Житомир, 2024.

У цьому дослідженні деякі моделі кінетики сушіння та гідратації термомодифікованої деревини сосни при її експлуатації були досліджені. За отриманими результатами можна констатувати, що деревина термомодифікованої деревини сосни може бути використана для виробництва деяких деталей меблів, пакувальної тари, в строительстве, в деревообробке, вагонка для бани, терасна дошка, полова дошка, обшивка стін для тепло та звукоізоляції.

Ключові слова: термомодифікована деревина сосни, кінетика гідратації та дегідратації, теплофізичні властивості

ANNOTATION

Moseichuk V.V. Study of drying and hydration kinetics of thermomodified pine wood. - Qualification work on manuscript rights.

Qualification work for obtaining a master's degree in specialty 205 - forestry. – Polis National University, Zhytomyr, 2024.

In this study, some models of drying and hydration kinetics of thermally modified pine wood during its operation were investigated. According to the obtained results, it can be stated that the wood of thermo-modified pine wood can be used for the production of some parts of furniture, packaging containers, in construction, in woodworking, paneling for baths, terrace board, floor board, wall cladding for heat and sound insulation.

Keywords: thermally modified pine wood, hydration and dehydration properties, thermophysical properties

ЗМІСТ

ВСТУП	4
РОЗДІЛ 1. СТАН ПИТАННЯ ТА ЗАВДАННЯ ДОСЛІДЖЕННЯ	5
РОЗДІЛ 2. МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ДИНАМІКИ ГІДРАТАЦІЇ ТА ДЕГІДРАТАЦІЇ ТЕРМОМОДИФІКОВАНОЇ ДЕРЕВИНИ	8
РОЗДІЛ 3. ОБЧИСЛЮВАЛЬНИЙ ЕКСПЕРИМЕНТ	13
РОЗДІЛ 4. НАТУРНИЙ ЕКСПЕРИМЕНТ ГІДРАТАЦІЇ ТА ДЕГІДРАТАЦІЇ	16
4.1. Матеріали та методи	16
4.2. Результати та обговорення	18
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ ТА РЕКОМЕНДАЦІЇ	32
ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	33
ДОДАТКИ	37

ВСТУП

Термомодифікована деревина, що отримана шляхом обробки деревини під впливом високих температур, демонструє покращені фізико-механічні властивості та стійкість до біологічних впливів. Основним етапом, що визначає ефективність використання термомодифікованої деревини, є процес сушіння та подальша гідратація. Це дослідження має на меті вивчити кінетичні особливості цих процесів для термомодифікованої деревини сосни.

Сушіння деревини є важливим етапом у її обробці, оскільки від вмісту води залежить подальша обробка, механічні властивості, стійкість до гниття та тривалість експлуатації матеріалу. Термомодифікація змінює вологісні характеристики деревини, що впливає на кінетику сушіння та гідратації.

Для дослідження були вибрані зразки термомодифікованої деревини сосни, отримані при температурі 180°C. Зразки мали однакові розміри та масу.

Сушіння проводили в камерних умовах при контролі температури та вологості. Вимірювання проводили у різні часові проміжки для отримання кривих сушіння.

Гідратаційні процеси досліджували шляхом занурення висушених зразків у підготовлену воду на різні інтервали часу. Після кожної фази спостерігали за змінами маси та структури деревини.

Отримані дані свідчать, що термомодифікована деревина сосни сушиться більш швидко, ніж некондиційна. Це пов'язано з розподілом води та змінами в мікроструктурі деревини, зафіксованими спостереженнями.

Гідратація термомодифікованої деревини також показала швидший обмін води. Однак досягнення рівноважного стану виявилось повільнішим у порівнянні з сушінням, що свідчить про наявність структурних змін у клітинній стінці.

Отримані результати підтверджують, що термомодифікація істотно впливає на кінетику сушіння та гідратації деревини сосни, створюючи нові можливості для використання цього матеріалу в різних сферах. Полегшення

процесів сушіння може привести до зниження витрат енергії, а контроль над гідратацією здатен підвищити довговічність виробів.

Дослідження кінетики сушіння та гідратації термомодифікованої деревини сосни показало, що термомодифікація значною мірою змінює фізико-хімічні властивості даного матеріалу, активно впливаючи на процеси, що відбуваються під час його обробки. Це відкриває нові горизонти для подальших досліджень та практичного застосування в промисловості.

Метою даного дослідження було також вивчення де яких фізичних властивостей термомодифікована деревина сосни (ТМДС) що виросла в регіоні українського полісся, та визначити відмінності у фізичних властивостях термомодифікованої деревина сосни (ТМДС) від інших популярних порід, а саме сосни та повловнії.

При вирішенні поставленого завдання використовувалися наступні методики дослідження: обчислювальний експеримент у середовищі MATHCAD; метод визначення межі гігроскопічності.

Об'єкт дослідження – термомодифікована деревина сосни (ТМДС).

Предмет дослідження – властивості гідратація та дегідратація термомодифікованої деревини сосни порівняно із звичайною сосною після гідротермічній обробці.

Публікації по темі досліджень:

1. Мосейчук В.В., магістрант, Ілащук П.Ю., магістрант, Горбатюк Р.В., магістрант, Кульман С.М., кандидат технічних наук, дослідження кінетики сушіння та гідратації термомодифікованої деревини сосни. II Міжнародної науково-практичної конференції «актуальні проблеми дослідження лісових та урбоекосистем України в умовах воєнного стану» (20 листопада 2024 року): Київ – 2024.– 221 с.
2. Ілащук П.Ю., студент, Мосейчук В.В., студент, Горбатюк Р.В., студент Дслідження теплообміну при просоченні та сушінні деревини. Ліс, наука,

молодь: матеріали XII Всеукр. наук.-практ. конф. (26 листопада 2024 р.). – Житомир: Поліський національний університет, 2024. – 193 с.

3. Мосейчук В.В., студент, Горбатюк Р.В., студент Ілащук П.Ю., студент, Кульман С.М., кандидат технічних наук, Феномен реологічного вибуху деревини і деревних композитах, Ліс, наука, молодь: матеріали XII Всеукр. наук.-практ. конф. (26 листопада 2024 р.). – Житомир: Поліський національний університет, 2024. – 193 с.

Практичне значення одержаних результатів. Результати досліджень дозволили отримати статистично значущі величини фізичних властивостей ТМД сосни, порівняти їх фізичні властивості з іншими породами та виробити рекомендації щодо її промислового використання.

Структура та обсяг роботи. Робота містить 30 сторінок основного тексту, 20 малюнків, 47 найменувань літератури та додатки.

РОЗДІЛ 1. СТАН ПИТАННЯ ТА ЗАВДАННЯ ДОСЛІДЖЕННЯ

Взаємодія деревини та води відіграє центральну роль у використанні деревини, оскільки вода впливає на багато важливих характеристик деревини. Ця тема досліджується понад століття, але нові знання продовжують генеруватися внаслідок вдосконалення експериментальних та обчислювальних методів.

Дерев'яні вироби є ключовими складовими сучасного суспільства і їх можна знайти всюди навколо нас у нашому повсякденному житті. Для всіх застосувань деревини матеріал піддається впливу води у вигляді пари у повітрі, а іноді і у вигляді рідкої води (наприклад, зовнішні дерев'яні конструкції, що піддаються впливу дощу). Подібно до багатьох біоматеріалів, деревина притягує молекули води з навколишнього середовища і поглинає їх усередині матеріалу структури. Ця вода різко впливає на характеристики матеріалу, які є важливими для застосування деревини. Наприклад, вода впливає на структурне використання деревини, змінюючи механічні властивості (жорсткість, міцність, повзучість) та розміри матеріалу [1–5].

Вода також змінює теплоємність та теплопровідність [6–9], тим самим впливаючи на експлуатаційні характеристики деревини та деревних ізоляційних матеріалів. Вироби з деревини повинні мати тривалий термін служби, але вода може вплинути на це, оскільки високий вміст вологи сприяє розкладанню гнильними грибками [10–12]. З іншого боку, виробництво волокон чи біохімічних речовин із деревини вимагає ефективного розкладання матеріал, якому вода допомагає у переробці деревної біомаси [13,14].

Крім того, транспорт води у деревині важливий, наприклад, при сушінні деревини. Таким чином, взаємодія води з деревиною займає центральне місце у всіх аспектах використання дерева у суспільстві. Через важливість взаємодії деревини та води цю тему було вивчено вже понад століття [4,10,15,16] та кілька книг та оглядів узагальнили існуючі дані та знання за багато років [17–25]. Нові та покращені експериментальні та обчислювальні методи були

впроваджені в область науки про деревину. Ця еволюція продовжує генерувати дані, які суперечать, підтверджують чи вносять нові нюанси у наші існуючі уявлення про воду у деревині. Це змушує нас регулярно переосмислювати та переформулювати наше розуміння води у деревині.

Процеси просочування (гідратації) можна розглядати як сукупність таких фізичних явищ:

- рух рідини в деревині під дією капілярного тиску;
- рух рідини в деревині під дією надлишкового тиску;
- дифузійне переміщення молекул та іонів просочувальних речовин в деревині по порожнинах клітин, заповнених водою [26].

На інтенсивність просочення впливають особливості капілярної будови деревини. В деревині хвойних порід водопровідну функцію переважно виконують трахеїди, діаметр порожнин яких в ранній зоні коливається від 3×10^{-5} до 5×10^{-5} м; в пізній зоні їхній розмір є наполовину меншим. Поєднуються між собою трахеїди обрамленими порами, перегородженими мембранами з отворами діаметром $2 \times 10^{-7} - 6 \times 10^{-7}$ м. Порівняльна капілярна проникливість визначається кількістю пор, їхнім діаметром та кількістю отворів у мембранах [27].

Мета цього дослідження полягала також в обґрунтуванні та створенні моделі гідратації та дегідратації, яка могла б бути основою способу прогнозування тривалості технологічних операцій пов'язаних із термомодифікацією деревини.

РОЗДІЛ 2. МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ДИНАМІКИ ГІДРАТАЦІЇ ТА ДЕГІДРАТАЦІЇ ТЕРМОМОДИФІКОВАНОЇ ДЕРЕВИНИ

Деревина є природним волокнистим композиційним матеріалом, аморфну матрицю якого (лігнін) армують одномірні наповнювачі – макромолекули целюлози та геміцелюлози [26]. Лігнін, целюлоза та геміцелюлози – це високомолекулярні сполуки (далі – полімери). У клітинних стінках деревних порід помірної кліматичної зони вони становлять 97...99 % маси деревини і визначають комплекс її властивостей, зокрема, здатність до набухання. Набухання – це одностороннє поглинання полімерами низькомолекулярних рідин, що супроводжується збільшенням їх обсягу та маси [27]. Хоча процеси гідратації (зволоження, набухання, просочення) та дегідратації (сушіння) деревини вивчаються протягом усієї історії людської цивілізації, остаточного розуміння цих процесів досі не відбулося. Тому вивчення цих процесів з погляду кінетики їхнього протікання є важливим завданням, як у теоретичному, так і в плані практичного її застосування. Складна, багаторівнева будова деревини призводить до того, що гідратацію розглядають як правило у вигляді сукупності таких фізико-хімічних явищ як рух рідини в деревині під дією капілярного тиску; рух рідини під впливом зовнішнього тиску; дифузійне переміщення молекул [27]. На теперішній час є немало робіт з питань взаємодії деревини та води. Однак, у цих роботах є протиріччя, неузгодженість окремих положень. Пояснюється це тим, що фізична система вода - деревина надзвичайно складна. Деревина має складний хімічний вміст і будову, а вода - специфічну структуру. Схематично структурна схема деревини представлена на Рис. 1. При взаємодії змінюються властивості обидвох компонентів: деревинна речовина переходить від склоподібного стану в колоїдний, вода вільного стану у зв'язаний. Крім того, до зв'язаної вологи в колоїдних тілах не можна застосовувати закони капілярних явищ, гідростатики та гідродинаміки, тому що вона знаходиться в адсорбційному зв'язку з деревиною. На думку Чудінова

Б.С., деревину можна вважати капілярне пористим тілом. Тому, з точки зору технології сушіння, просочування і теплової обробки в деревині виділяють дві провідні системи макрокапілярну та мікрокапілярну.

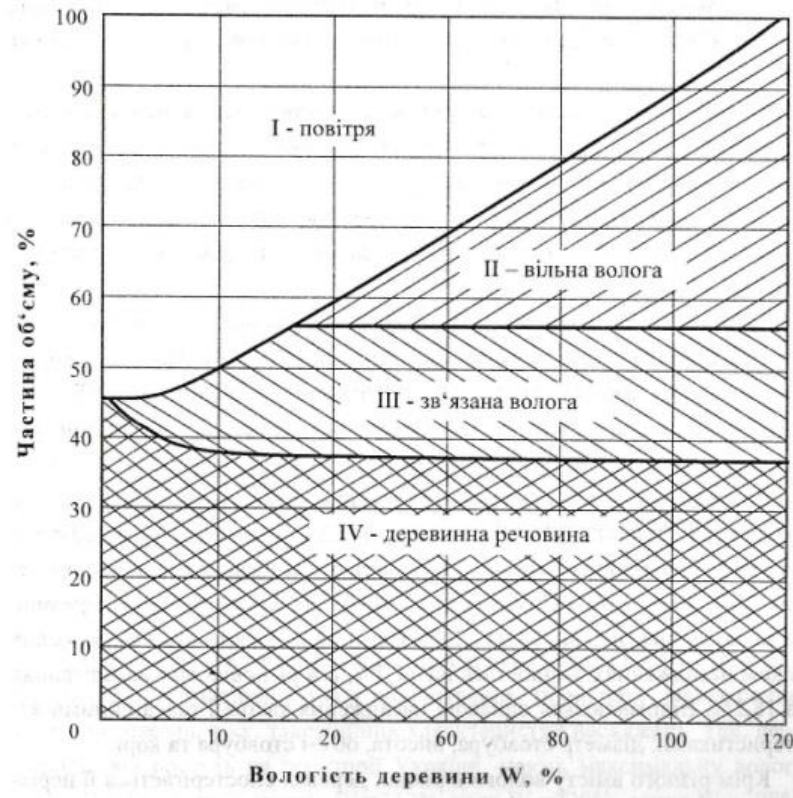
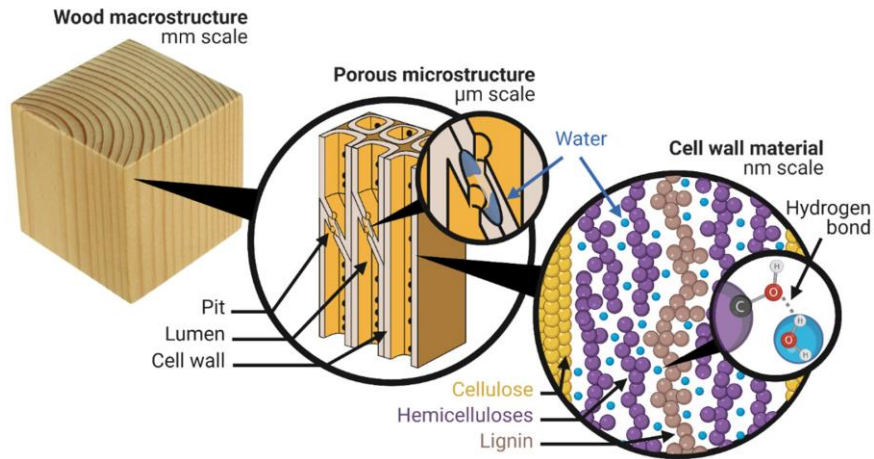


Рис. 1. Структурна схема «деревина – вода – повітря» [27]

Макрокапілярна система утворена порожнинами судин (мінімальний радіус макрокапіляра 10^{-5} см), а мікрокапілярна - системою сполучених судин у стінках клітин (радіус мікрокапіляра, як правило, не перевищує 3×10^{-7} см).

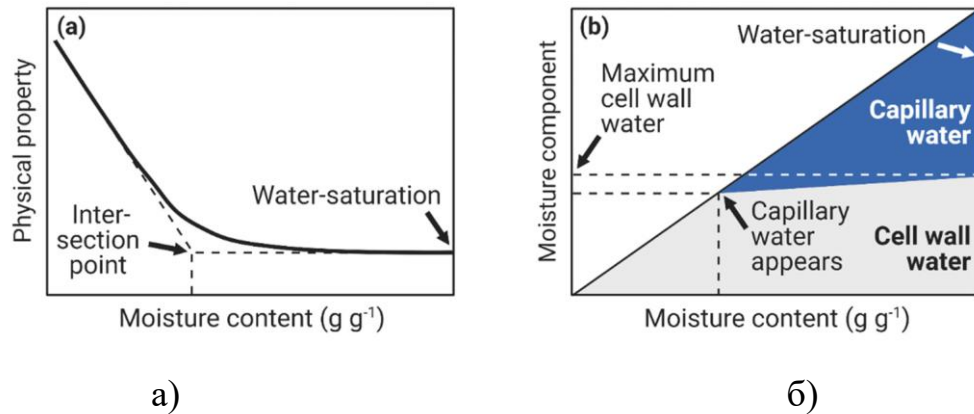
Вологу, яка знаходиться в деревині, поділяють на вільну і зв'язану. Вільна вода знаходиться в порожнинах клітинних стінок і утримується в них механічно. Зв'язану воду, в свою чергу, розділяють на адсорбційну, яка утворює міжмікрофібрилярні прошарки в клітинній стінці та мікрокапілярну, яка знаходиться у вільних від деревинної речовини просторах клітинної стінки [27].



Wood macrostructure – макроструктура деревини (мм шкала, 10^{-3} м); Porous microstructure – вода в мікроструктурі пор (мкм шкала, 10^{-6} м); Water – вода; Cell wall material – матеріал клітинної стінки (нм шкала, 10^{-9} м); Hydrogen bond – водородна зв'язь. Pit – ємкість. Lumen – порожнина клітини. Cell wall – клітинна стінка. Cellulose – целюлоза. Hemicelluloses – гемицелюлоза. Lignin – лігнін.

Рис. 2. Вода у різних частинах деревини. Вода клітинної стінки знаходиться всередині твердих стінок, де вона взаємодіє з гідроксил складових полімерів (целюлоза, гемицелюлоза, лігнін) водневими зв'язками. Капілярна вода знаходиться в пористій мікроструктурі деревини, наприклад, у ямках та в люмінах (порожнинах) [28].

Виходячи з цієї теорії будови деревини можна припустити, що кінетика гідратації може відбуватися одночасно двома шляхами. Перший це капілярний рух рідини в мікрокапілярах, і другий - капілярний рух рідини в макрокапілярах. Оскільки швидкість капілярного руху безпосередньо залежить від радіуса капіляра, а саме, чим менше радіус, тим більший капілярний тиск, можна припустити, що гідратація деревини повинна відбуватися в два етапи. На першому заповнюються всі мікрокапіляри (пов'язана вода) та частина макрокапілярів, а на другому заповнюються всі макрокапіляри (вільна вода), Рис. 3.



Physical property – фізические свойство. Moisture content – относительное содержание влаги (г/г). Water-saturation – водяное насыщение. Moisture component – водяной компонент. Maximum cell wall water – максимальное содержание воды в стенках клеток (связанная вода – вода в микрокапиллярах). Capillary water – свободная вода (вода в макрокапиллярах). Capillary water appears – появление воды в макрокапиллярах (свободная вода).

Рис. 3. Різні стани вологості пов'язані з літературними визначеннями точки насичення волокна (FSP). (а) зміни фізичних властивостей та (б) розподіл води в деревині на капілярну воду та воду клітинної стінки. В (а) FSP визначається як вміст вологи на перетині точки двох лінійних режимів, тоді як (б) FSP визначається як максимальний вміст вологості в клітинній стінці або як стан вологості, при якому з'являється капілярна вода. Зверніть увагу, що різні визначення не відносяться до того самого стану вологості деревини.

Попередньо проведені експерименти з гідратації павловнії та сосни дозволили зробити висновок про те, що процес гідратації (просочення) деревини можна розглядати як аналог хімічної реакції першого порядку. Тому кінетична схема паралельного процесу з двома елементарними стадіями першого порядку та двома кінцевими продуктами буде наступною:



має математичну модель як системи звичайних диференціальних рівнянь:

$$\frac{dV_{\Sigma}(t)}{dt} = -(k1 + k2)V_{\Sigma}(t) \quad (3)$$

$$\frac{dV_{\mu}(t)}{dt} = k_1 V_{\Sigma}(t) \quad (4)$$

$$\frac{dV_m(t)}{dt} = k_2 V_{\Sigma}(t), \quad (5)$$

де $V_{\Sigma}(t)$ – загальний обсяг мікро та макро капілярів не заповнених водою, м³;
 $V_{\mu}(t)$ – об'єм мікрокапіляр заповнених водою, м³; $V_m(t)$ – об'єм макрокапіляр заповнених водою, м³; k_1 – швидкість заповнення водою мікрокапілярів, м³/с;
 k_2 – швидкість заповнення водою макрокапілярів, м³/с.

РОЗДІЛ 3. ОБЧИСЛЮВАЛЬНИЙ ЕКСПЕРИМЕНТ

Для того, щоб краще зрозуміти тенденцію розвитку краще користуватися безрозмірними величинами, тому що вони найінформативніші і не прив'язані до систем відліку.

Введемо нові безрозмірні величини вимірювань ступенем гідратації, а саме – безрозмірний вологовміст (концентрацію води):

$$CA(t) = M(t)/M_0; CB(t) = (MB(t)-M_0)/M_0; CC(t) = (MC(t)-M_0)/M_0,$$

де $CA(t)$ - концентрація води у зразку в момент часу t , г/г; $M(t)$ - вага просоченого зразка в момент часу t ; M_0 – вага зразка на момент початку випробувань, тобто. $t = 0$. $CB(t)$ – концентрація води в мікрокапілярах на момент часу t ; $MB(t)$ – вага води в мікрокапілярах на момент часу t ; $CC(t)$ – концентрація води в макрокапілярах на момент часу t ; $MC(t)$ – вага води в мікрокапілярах на момент часу t ;

Нелінійна динамічна модель у вигляді системи нелінійних диференціальних рівнянь:

$$\begin{cases} \frac{dCA(t)}{dt} = -k_1 CA(t) - k_2 CA(t) \\ \frac{dCB(t)}{dt} = k_1 CA(t) \\ \frac{dCC(t)}{dt} = k_2 CA(t) \end{cases} \quad (6)$$

$$\begin{aligned} &\text{із початковими умовами: } t = 0; CA_0 = 1; \\ &CA(0) = CA_0, CB(0) = CC(0) = 0. \end{aligned} \quad (7)$$

Розв'язавши цю систему диференціальних рівнянь (6) за початкових умов (7) використовуючи математичне середовище MathCAD, наприклад, операторним методом, отримаємо наступні значення зміни фазових змінних у часі (інтегральні криві):

$$CA(t) = CA_0 e^{-(k_1+k_2)t}$$

$$CB(t) = \frac{k_1}{k_1 + k_2} CA0 [1 - e^{-(k_1 + k_2)t}]$$

$$CC(t) = \frac{k_2}{k_1 + k_2} CA0 [1 - e^{-(k_1 + k_2)t}]$$

Проведемо обчислювальний експеримент із використанням параметричного аналізу побудованої математичної моделі.

Метою цього експерименту є визначення можливостей моделі спочатку якісно описувати процеси, що відбуваються у разі гідратації. Для цього можна застосувати так званий параметричний аналіз. При якому нам необхідно шляхом зміни параметрів моделі оцінити зміну форми інтегральних кривих, щоб оцінити логічний зв'язок зміни параметрів з логікою зміни фазових змінних у часі.

Оскільки параметрами нашої системи є швидкості гідратації, ми також визначимо, як змінюється процес гідратації залежно від співвідношення швидкостей процесів.

На рис. 4 представлена кінетична схема моделі за певних початкових умов. На Рис. 5 показані графіки зміни у часу динамічних фазових змінних (інтегральні криві) у часу від 0 до 219,19 год.

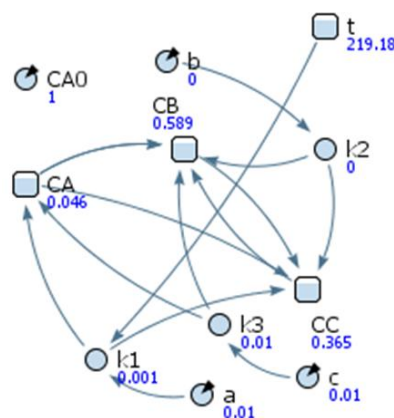


Рис. 4. Кінетична схема моделі у момент модельного часу 219,18 год.

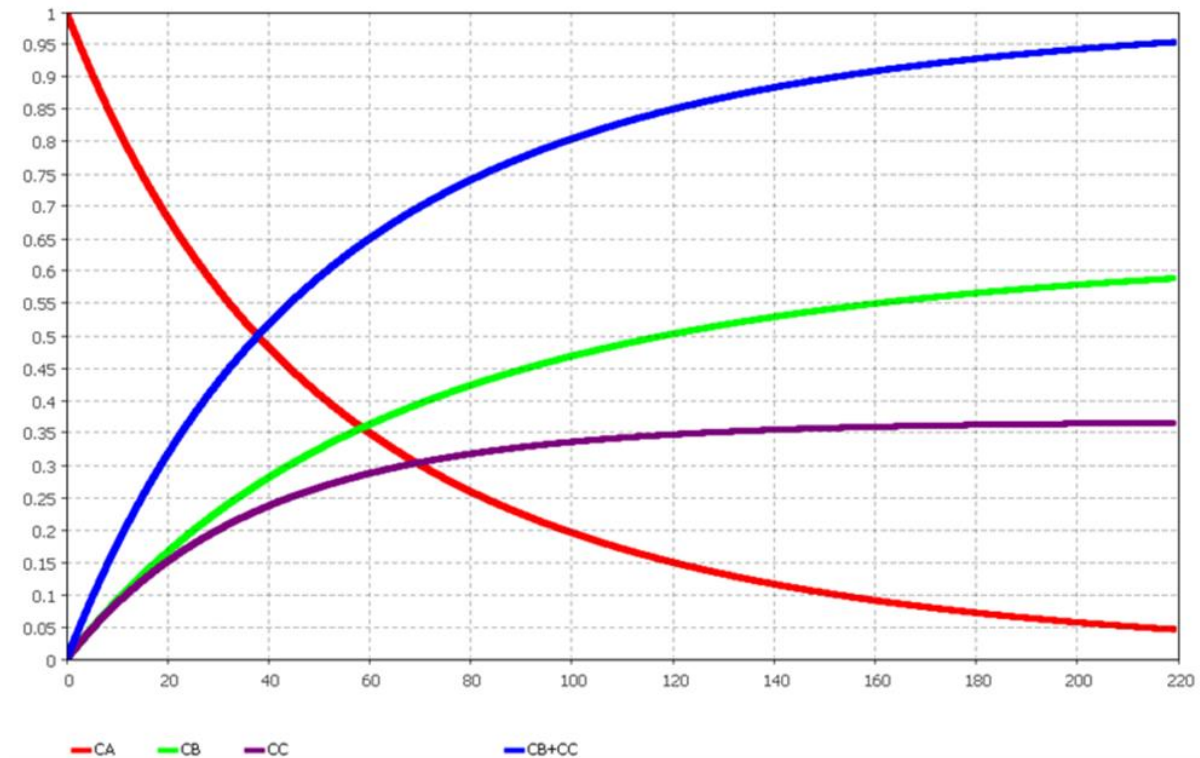


Рис. 5. Графіки зміни у часу динамічних фазових змінних (інтегральні криві) у часу від 0 до 219,18 год.

Модель одночасного протекуч процесів гідратації та дегідратації тмдс, которая враховує періодичність цих процесів при експлуатації. (на прикладі терасної дошки). Експлуатація терасної дошки відбувається у досить жорстких умовах, оскільки зовнішні атмосферні впливи часто змінюють залежно від погоди. Якщо йде дощ, вона зволожується з однієї частини (гідратація), якщо немає дощу, вона поступово висихає в умовах атмосферного сушіння (дегідратація). Основні режими атмосферного впливу показано на рис. у додатку.

Як фазова змінна була прийнята загальна маса води в деревині яка постійно змінюється внаслідок водопоглинання та випаровування.

Модель описує зростання вологовмісту, під час якого відбувається постійна зміна у часі загальної вологості деревини. При цьому зміна загальної вологості буде визначатися основним кінетичним рівнянням, яке відображає закон збереження маси:

$$dW(t) = dW^+(t) - dW^-(t) \quad (1)$$

де $dW^+(t)$ – збільшення загальної маси води за рахунок просочення, тобто в загальному випадку це дифузія, (прихід), у проміжок часу $d(t)$, кг;

$dW^-(t)$ – зменшення загальної маси води в деревині, за рахунок випаровування (витрати) у проміжок часу $d(t)$, кг.

Для того, щоб краще зрозуміти тенденцію розвитку, краще користуватися безрозмірними величинами, тому що вони найбільш інформативні і не прив'язані до систем відліку.

Щоб мати можливість порівнювати і вивчати кінетику зростання кількох різних порід, що одночасно спостерігаються, які при цьому мають різну початкову масу, введемо нові безрозмірні величини вимірювань вологовмісту, а саме – безрозмірний вологовміст (концентрацію):

$$CB(t) = \frac{W(t)}{W_0}. \quad (8)$$

Тоді, враховуючи початкові умови (7), можна записати їх у вигляді:

$$t = 0: CB(0) = 1; CA(t) = 0; CC(t) = 0. \quad (9)$$

Попередньо проведені експерименти з гідратації дозволили зробити висновок про те, що процес гідратації (просочення) деревини можна розглядати як аналог хімічної реакції першого порядку. Тому кінетична схема послідовного процесу з двома елементарними стадіями першого порядку буде наступною:



де $CB(t)$ – поточна середня концентрація води у деревині на час, t ; $CA(t)$ – максимальна концентрація води всередині деревини в момент часу, t "джерело вологи"; $CC(t)$ – мінімальна концентрація води лежить на поверхні деревини у момент часу, t ; k_1 – швидкість збільшення концентрації води у деревині за рахунок дифузії та інших механізмів просочення (коефіцієнт дифузії), $\text{г}^*\text{см}^{-2}\text{с}^{-1}$; k_2 – швидкість зменшення концентрації води у деревині з допомогою випаровування з поверхні деталі, $\text{г}^*\text{см}^{-2}\text{с}^{-1}$.

Використовуючи нові позначення, можемо записати основне визначальне рівняння (1) у вигляді:

$$\frac{dCB(t)}{dt} = k_1[CA(t) - CB(t)] - k_2[CB(t) - CC(t)]$$

Розв'яжемо дане диференціальне рівняння за стандартним методом поділу змінних, яке представлено у вигляді лістингу в математичному середовищі MathCad_13 на рис. 6.

$$\begin{aligned} \frac{dC}{dt} &= k_1 \cdot (C_m - C) - k_2 \cdot (C - C_0) \\ \int_{C_0}^C \frac{1}{k_1 \cdot (C_m - C) - k_2 \cdot (C - C_0)} dC &\rightarrow \frac{-\ln[(-C) \cdot k_1 - C \cdot k_2 + k_1 \cdot C_m + k_2 \cdot C_0]}{k_1 + k_2} + \frac{\ln[(-k_1) \cdot (C_0 - C_m)]}{k_1 + k_2} \\ \int_{t_0}^t 1 dt &\rightarrow t - t_0 \\ \text{Given} \\ \frac{-\ln(k_1 \cdot C_m - k_1 \cdot C - k_2 \cdot C + k_2 \cdot C_0)}{k_1 + k_2} + \frac{\ln[(-k_1) \cdot (C_0 - C_m)]}{k_1 + k_2} &= t - t_0 \\ t_0 &:= 0 \\ \text{Find}(t) &\rightarrow \frac{-[\ln[(-C) \cdot k_1 - C \cdot k_2 + k_1 \cdot C_m + k_2 \cdot C_0] - \ln[(-k_1) \cdot (C_0 - C_m)]]}{k_1 + k_2} \\ t &:= \frac{(-\ln(k_1 \cdot C_m - k_1 \cdot C - k_2 \cdot C + k_2 \cdot C_0)) + \ln[(-k_1) \cdot (C_0 - C_m)]}{k_1 + k_2} \\ C_m &:= 45 \quad C_0 := 10 \quad k_1 := 0.15 \quad k_2 := 0.015 \\ C &:= 41.82 \\ \frac{(-\ln(k_1 \cdot C_m - k_1 \cdot C - k_2 \cdot C + k_2 \cdot C_0)) + \ln[(-k_1) \cdot (C_0 - C_m)]}{k_1 + k_2} \text{ float, 3} &\rightarrow 59.2 - 19.0 \cdot i \\ \left(59.2^2 + 19^2\right)^{0.5} &\rightarrow 62.174271206022190092 \end{aligned}$$

Рис. 6. Лістинг рішення основного визначального рівняння (1) у математичному середовищі MathCad_13.

РОЗДІЛ 3. ОБЧИСЛЮВАЛЬНИЙ ЕКСПЕРИМЕНТ

Для того, щоб краще зрозуміти тенденцію розвитку краще користуватися безрозмірними величинами, тому що вони найінформативніші і не прив'язані до систем відліку.

Введемо нові безрозмірні величини вимірювань ступенем гідратації, а саме – безрозмірний вологовміст (концентрацію води):

$$CA(t) = M(t)/M_0; CB(t) = (MB(t)-M_0)/M_0; CC(t) = (MC(t)-M_0)/M_0,$$

де $CA(t)$ – максимальна концентрація води у зразку в момент часу t , г/г; $M(t)$ – вага просоченого зразка в момент часу t ; M_0 – вага зразка на момент початку випробувань, тобто. $t = 0$. $CB(t)$ – концентрація води на момент часу t ; $MB(t)$ – вага води на момент часу t ; $CC(t)$ – мінімальна концентрація води на момент часу t ; $MC(t)$ – вага води в мікрокапілярах на момент часу t ;

Проведемо обчислювальний експеримент із використанням параметричного аналізу побудованої математичної моделі.

Метою цього експерименту є визначення можливостей моделі спочатку якісно описувати процеси, що відбуваються у разі гідратації. Для цього можна застосувати так званий параметричний аналіз. При якому нам необхідно шляхом зміни параметрів моделі оцінити зміну форми інтегральних кривих, щоб оцінити логічний зв'язок зміни параметрів з логікою зміни фазових змінних у часі.

Оскільки параметрами нашої системи є швидкості гідратації, ми також визначимо, як змінюється процес гідратації залежно від співвідношення швидкостей процесів.

На рис. 7 представлена кінетична схема моделі за певних початкових умов. На рис. 8 показані графіки зміни у часу динамічних фазових змінних (інтегральні криві) у часу від 0 до 62 год.

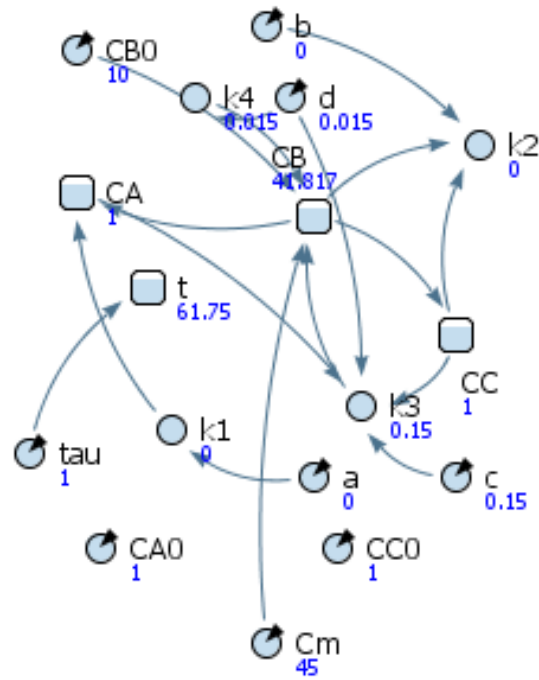


Рис. 7. Кінетична схема моделі у момент модельного часу 61,75 год.

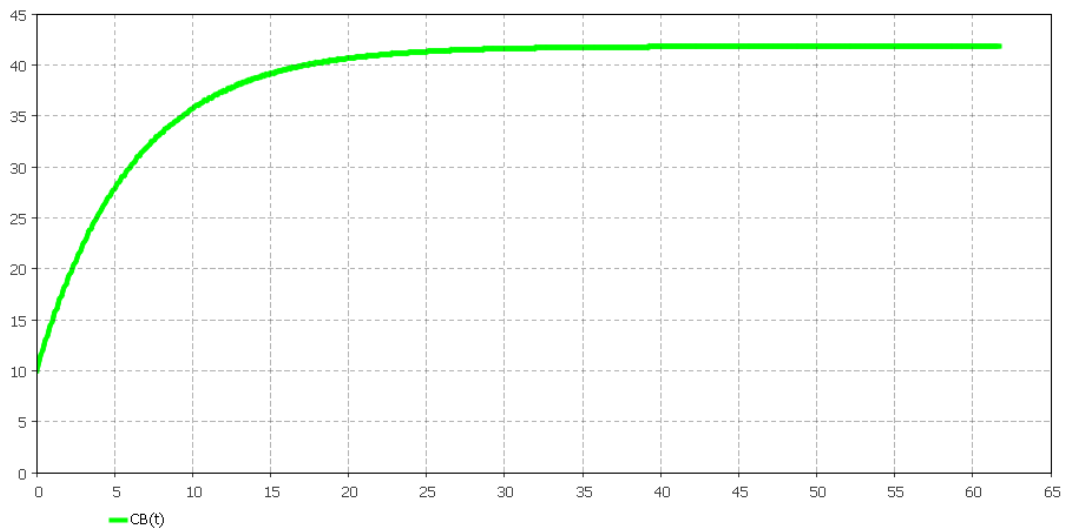


Рис. 8. Графіки зміни у часу динамічної фазової змінної $CB(t)$ у часу від 0 до 61,75 год. Етап зволоження, тобто створення в деревині "джерела вологи".

РОЗДІЛ 4. НАТУРНИЙ ЕКСПЕРИМЕНТ ГІДРАТАЦІЇ І ДЕГІДРАТАЦІЇ

4.1. Матеріали та методи

Пиломатеріал, який послужить базовим матеріалом для зразків, Було використано термомодифіковану сосна виробництва ТОВ «АГ ВУД», м. Київ, розмірами 2000x120x30 мм. Основні технічні характеристики, а також технології термомодифікації якої представлені на рис. .



Рис. 9. Об'єкт дослідження – терасна дошка та її основні технічні характеристики.

Дослідження проводилися в стандартних кліматичних умовах ($T=20^{\circ}\text{C}$; $\varphi=65\%$) до рівноважної вологості – на зразках, що зберігаються.

Для порівняння фізичних властивостей термомодифікованої сосни з сосною не модифікованою і павловниєю так само не термомодифіковані випробування проводилися для цих 3-х матеріалів одночасно за тих самих умов. На рис. 10 представлена вихідна таблиця матеріалів з вихідними величинами - розмірами та їх вагами.

Як початкові умови вимірювалися так само вологовміст (вологість) за допомогою електронних вологомірів.

№	Матеріал	L mm	l mm	T mm	V mm ³	P. 2	D кг/м ³
1	сосна	86,5	39,9	39,9		55,55	
2	сосна	76,5	40,1	40,1		57,44	
3	сосна ТМЦ	72,7	64,8	30,4		52,38	
4	—II—	73,5	64,1	30,6		53,83	
5	—II—	71,0	60,1	30,6		52,28	
6	—II—	70,4	59,8	30,1		51,98	
7	ПАВЛОВ	72,3	59,6	39,4		55,26	
8	ПАВЛ.	72,9	61,8	39,4		53,15	

Рис. 10. Матеріали та їх вихідні розміри та вага.

Рис. 11 представлені зразки для стандартних випробувань на гідратацію та дегідратацію, а також електронний штангенциркуль (0,01 мм) та термометр (0,1 °C).

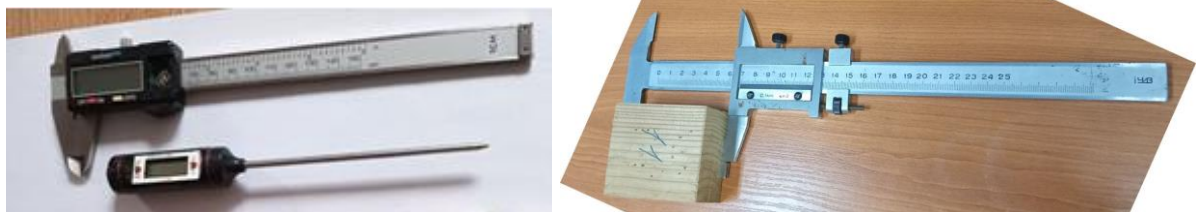


Рис. 11. Зразки

При проведенні випробувань використовувалися зразки сосни та Paulownia energy (Рис.11) із вологістю МС 10,5%. Вихідна вологість термомодифікованої сосни становила МС 0% (Рис.12). Густина матеріалів: $\rho_{\text{сосна}} = 438 \text{ кг/м}^3$, $\rho_{\text{сосна термомодифікована}} = 394 \text{ кг/м}^3$, $\rho_{\text{павловнія}} = 312 \text{ кг/м}^3$. Вологість та температура у приміщенні RH 65% та 20°C відповідно. В кожній серії було випробувано по 6 зразків.



Рис. 12 . Результати вимірювання вихідної вологості термомодифікованої сосни моделі вологомірів.

Дослідження гідратації (просочення) та дегідратації (сушіння) зразків проводили шляхом проведення серій кількох експериментів.

1 серія. Вимірювання гідратації (водопоглинання) проводилося шляхом повного занурення одночасно у воду всіх зразків, рис. 13. Для порівняння використовувалися також зразки такого ж розміру сосни щільністю 438 кг/м³. Випробування проводилися згідно з рекомендаціями ГОСТ 16483.32-77 ДЕРЕВИНА. Метод визначення межі гігроскопічності.



Рис. 13. Вимірювання гідратації (водопоглинання) шляхом повного занурення одночасно у воду всіх зразків.

Вимірювання ступеня гідратації оцінювали шляхом вимірювання величини поступового насичення зразків водою, тобто величиною концентрації води в деревині:

$$CA(t) = M(t)/M_0,$$

де $CA(t)$ – концентрація води у зразку в момент часу t , г/г (безрозмірна вага); $M(t)$ – вага просоченого зразка в момент часу t ; M_0 – вага зразка на момент початку випробувань, тобто. $t = 0$.

Для визначення ваги використовувалися електронні ваги фірми RADWAG WPT-1 з точністю вимірів $0,01$ г, рис. 14.



Рис. 14. Визначення ваги.

2 серія. Визначення швидкості дегідратації (сушіння) термомодифікованої сосни проводилася шляхом природного добування образців у приміщенні лабораторії. Вологість та температура у приміщенні в середньому RH 65% та 20°C відповідно. При цьому періодично визначалася величина $CA(t)$.

4.1. Результати та обговорення

1 і 2 серія. Результати гідратації та дегідратації представлені на Рис. 15, а також у таблицях 1 та 2.

		1	2	3	4	5	6	7	8	Wg%
18.09.24	10:50	55.92 105	56.81 105	52.05 0	53.42 0	57.92 0	55.60 0	54.24 10	52.62 11.5	
	13:35	61.28	61.82	55.32	57.16	55.62	59.14	60.59	59.63	
		66.57	66.97	60.22	62.17	59.54	63.10	66.76	66.96	
		10.16	8.24	8.7	7.61	7.5	12.02	14.34		
19.09.24	12:09	72.65	72.67	64.53	67.02	63.15	66.52	72.78	72.87	20
		21.13	21.67							
20.09.24	13:00	488		394	10%			312	29%	
23.09.24	12:12	410	466	305	369	400	492	82.74	83.36	33
	12:25	80.37	81.09	73.37	75.44	70.48	74.16	82.74	83.22	
	13:45	80.09	80.94	73.93	75.50	70.30	73.71			
		82.47	83.52	76.89	73.44	73.96	76.93	85.96	86.62	
25.09.24	12:44									
30.09.24	12:12	86.42	87.22	84.39	86.18	80.73	83.95	93.36	95.41	
02.10.24	12:15	86.53	87.99	86.44	88.29	82.23	85.18	95.47	98.16	
03.10.24	13:45	87.60	88.69	87.89	89.73	83.20	86.28	96.73	99.33	
07.10.24	12:00	88.40	89.70	91.11	92.95	85.69	88.26	100.85	102.87	
	19:48									
	17:46									
14.10.24	12:25	91.78	92.76	96.33	97.41	89.29	92.09	103.95	110.39	
16.10.24	12:13	92.11	93.37	97.07	98.10	89.95	92.55	103.56	110.89	
	13:46									
17.10.24	13:42	93.69	94.75	98.14	99.38	90.2		111.25	112.94	
17.10.24	16:00									
21.10.24	12:12	95.52	96.67	100.73	102.12	93.44		114.62	116.82	
28.10.24	12:15	97.65	98.20	104.22	105.25	95.61		119.42	119.82	
30.10.24	12:13	97.40	98.01	104.73	105.63	96.02		119.08	119.81	
31.10.24	13:40	98.53	99.15	105.81	107.25	96.66		120.90	122.68	
04.11.24	13:37	98.70	99.62	106.88	108.06	97.93		121.72	123.06	
11.11.24	13:33	101.40	101.72	103.62	110.82	100.59		126.09	127.11	
12.11.24	14:00	100.39	101.56	103.56	110.65	99.99		125.55	125.84	
13.11.24	09:58	100.46	101.79	110.07	111.01	100.07		125.95	126.31	
19.11.24	12:13	101.09	102.33	111.93	112.86	101.67		126.21	128.71	
26.11.24	10:55	102.55	103.84	112.82	115.19	103.40		130.89	131.70	
03.12.	13:10	104.23	114.23	115.22	116.82	105.12		132.49	133.75	
		105.53								

Рис. 15. Лістинг вихідних даних та результатів експериментів

Таблиця 1. Результати експериментів щодо зміни ваги зразків у координатах:
вага зразків, г – час, хв.

Дата	Час, год	Час, хв	Матеріали							
			1	2	3	4	5	6	7	8
			Сосна (1)	Сосна (2)	Сосна ТМД (3)	Сосна ТМД (4)	Сосна ТМД (5)	Сосна ТМД (6)	Павлов нія (7)	Павлов нія (8)
18.09.2024 10:50	0.1.00 0:00	0	55,92	56,81	52,05	53,42	51,93	55,60	54,74	52,62
18.09.2024 13:35	0.1.00 2:45	165	61,28	61,82	55,32	57,16	55,62	59,14	60,59	59,63
19.09.2024 12:09	0.1.00 22:34	1530	66,57	66,97	60,29	62,17	59,54	63,10	66,76	66,96
20.09.2024 13:00	1.1.00 0:51	3021	71,13	71,61	64,53	67,02	63,15	66,52	72,78	72,81
23.09.2024 12:25	2.1.00 23:25	7306	80,37	81,09	73,37	75,44	70,48	74,16	82,74	83,36
23.09.2024 13:45	0.1.00 1:20	7386	80,09	80,97	73,33	75,50	70,30	73,71	82,71	83,22
25.09.2024 12:44	1.1.00 22:59	10205	82,47	83,52	76,89	79,14	73,96	76,93	85,96	86,62
30.09.2024 12:12	4.1.00 23:28	17373	86,42	87,22	84,39	86,18	80,73	83,95	93,36	95,41
02.10.2024 12:15	2.1.00 0:03	20256	86,53	87,99	86,44	88,29	82,23	85,18	95,47	98,16
03.10.2024 13:45	1.1.00 1:30	21786	87,60	88,69	87,89	89,73	83,20	86,28	96,73	99,53
07.10.2024 12:00	3.1.00 22:15	27441	88,40	89,70	91,11	92,95	85,69	88,26	100,85	102,87
14.10.2024 12:25	7.1.00 0:25	37546	91,78	92,76	96,33	97,41	89,29	92,09	107,95	110,34
16.10.2024 12:13	1.1.00 23:48	40414	92,11	93,37	97,07	98,10	89,95	92,55	109,36	110,88
17.10.2024 13:42	1.1.00 1:29	41943	93,62	94,75	98,14	99,38	90,96	77,77	111,25	112,94
21.10.2024 12:12	3.1.00 22:30	47613	95,52	96,67	100,73	102,12	93,44	60,99	114,62	116,82
28.10.2024 12:15	7.1.00 0:03	57696	97,65	98,20	104,22	105,25	95,61	57,15	119,12	119,82
30.10.2024 12:13	1.1.00 23:58	60574	97,70	98,01	104,73	105,25	96,02	57,14	119,08	120,81
31.10.2024 13:40	1.1.00 1:27	62101	98,53	99,15	105,91	107,25	96,66	57,11	120,70	122,68
04.11.2024 13:37	3.1.00 23:57	67858	98,70	99,62	106,88	108,06	97,75	56,96	121,72	123,06
11.11.2024 13:33	6.1.00 23:56	77934	101,40	101,72	109,62	110,82	100,59	56,74	126,07	127,11
12.11.2024 14:00	1.1.00 0:27	79401	100,39	101,36	109,56	110,63	99,99	56,71	125,55	125,84
13.11.2024 9:58	0.1.00 19:58	80599	100,46	101,79	110,07	111,01	100,09	56,68	125,95	126,31
19.11.2024 12:13	6.1.00 2:15	89374	101,09	102,53	111,93	112,86	101,84	56,63	128,21	128,71
26.11.2024 10:55	6.1.00 22:42	99376	102,55	103,84	112,82	115,19	103,40	56,41	130,89	131,70

Таблиця 2. Результати експериментів щодо зміни ваги зразків у координатах:
безрозмірна вага зразків, г/г – час, хв.

Безрозмірна вага							
1	2	3	4	5	6	7	8
Сосна (1)	Сосна (2)	Сосна ТМД (3)	Сосна ТМД (4)	Сосна ТМД (5)	Сосна ТМД (6)	Павловнія (7)	Павловнія (8)
1	1	1	1	1	1	1	1
1,095851216	1,088188699	1,062824207	1,070011232	1,071057192	1,063669065	1,106868834	1,133219308
1,190450644	1,178841753	1,158309318	1,163796331	1,146543424	1,134892086	1,219583486	1,272519954
1,271995708	1,260517515	1,239769452	1,254586297	1,216060081	1,196402878	1,32955791	1,383694413
1,43723176	1,427389544	1,409606148	1,412205167	1,357211631	1,33381295	1,511508951	1,584188521
1,432224607	1,42527724	1,408837656	1,413328341	1,353745427	1,325719424	1,510960906	1,581527936
1,474785408	1,470163704	1,477233429	1,481467615	1,424224918	1,383633094	1,570332481	1,646142151
1,545422031	1,535293082	1,621325648	1,613253463	1,554592721	1,509892086	1,705516989	1,813188902
1,547389127	1,548847034	1,660710855	1,652751778	1,583477759	1,532014388	1,744062843	1,865450399
1,566523605	1,561168808	1,688568684	1,679707975	1,602156749	1,551798561	1,767080745	1,891486127
1,580829757	1,578947368	1,750432277	1,739985024	1,650105912	1,587410072	1,842345634	1,954960091
1,641273247	1,632811125	1,850720461	1,823474354	1,719430002	1,656294964	1,972049689	2,096921323
1,647174535	1,643548671	1,86493756	1,836390865	1,732139418	1,664568345	1,997807819	2,10718358
1,674177396	1,667840169	1,885494717	1,860351928	1,751588677	1,398741007	2,032334673	2,146332193
1,708154506	1,701637036	1,935254563	1,911643579	1,799345272	1,096942446	2,093898429	2,220068415
1,746244635	1,728568914	2,002305476	1,970235867	1,841132293	1,027877698	2,176105225	2,277080958
1,74713877	1,725224432	2,012103746	1,970235867	1,849027537	1,027697842	2,175374498	2,295895097
1,761981402	1,745291322	2,034774256	2,007675028	1,86135182	1,027158273	2,204968944	2,331432915
1,765021459	1,753564513	2,053410183	2,022837888	1,882341614	1,024460432	2,223602484	2,338654504
1,813304721	1,790529836	2,106051873	2,074503931	1,937030618	1,020503597	2,303069054	2,415621437
1,795243205	1,784192924	2,104899135	2,070947211	1,925476603	1,019964029	2,293569602	2,391486127
1,796494993	1,791762014	2,114697406	2,078060651	1,927402272	1,01942446	2,300876872	2,400418092
1,807761087	1,804787889	2,150432277	2,112691876	1,961101483	1,01852518	2,342162952	2,446028126
1,833869814	1,82784721	2,16753122	2,156308499	1,991141922	1,014568345	2,391121666	2,502850627

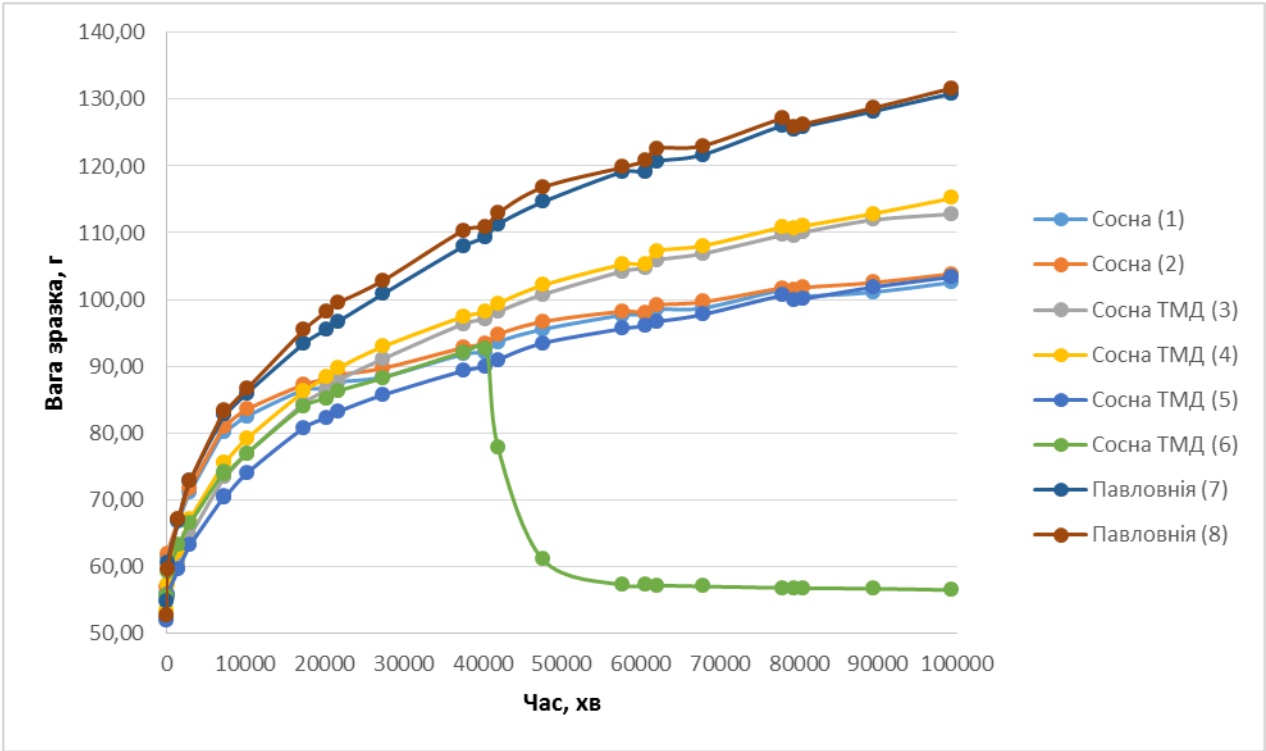


Рис. 16. Графік зміни ваги (g) зразків при їх гідратації та дегідратації за період з 18.09.2024 по 26.11.2024.

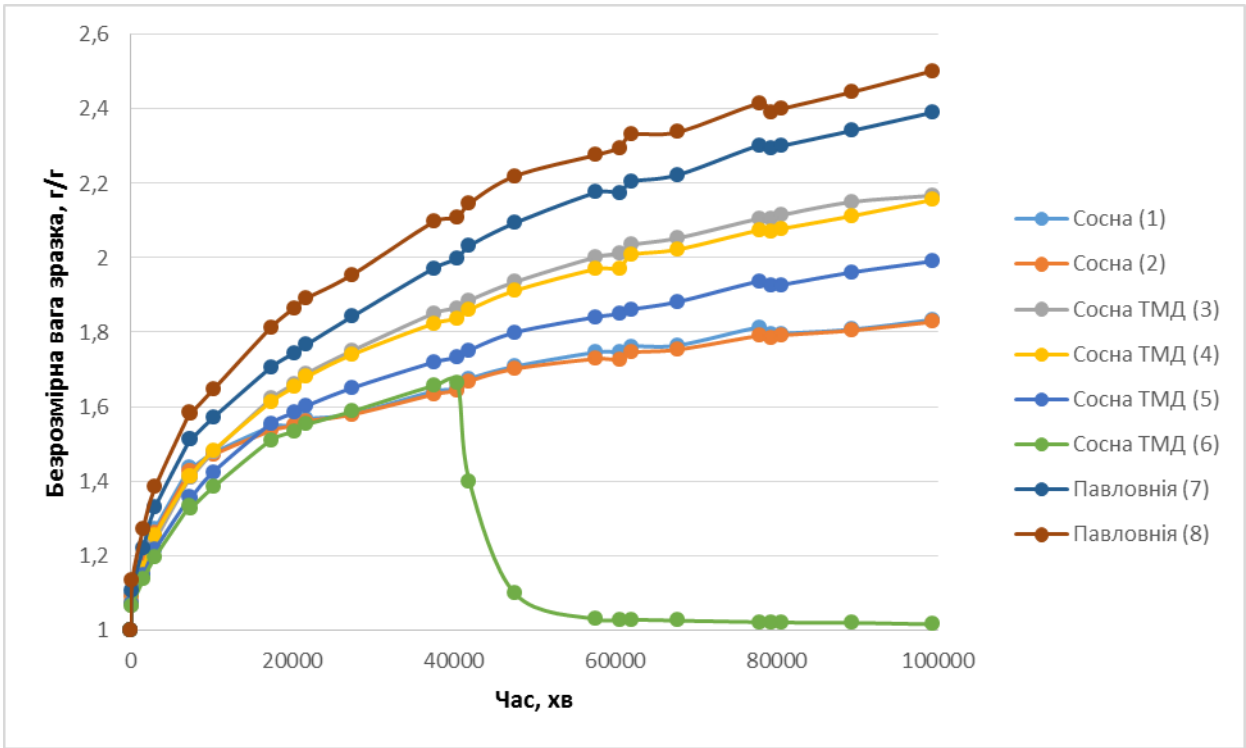


Рис. 17. Графік зміни безрозмірної ваги (g/g) зразків при їх гідратації та дегідратації за період з 18.09.2024 по 26.11.2024.

З аналізу графіків, показаних на рис. можна зробити висновок, що використання розмірної ваги образів більш інформативне порівняно з традиційними методиками згідно з ДСТУ. Тому надалі при порівнянні кінетики гідратації та дегідратації використовуватимемо безрозмірну вагу.

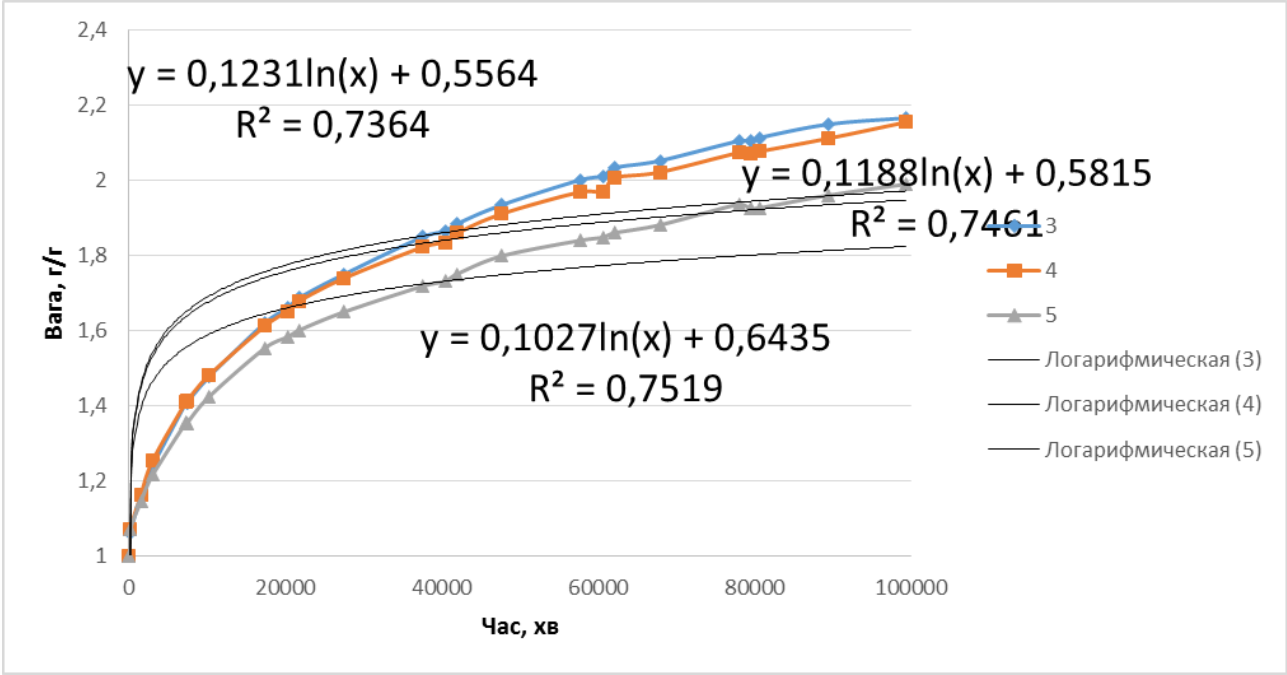


Рис. 18. Графік зміни безрозмірної ваги (г/г) зразків термомодифікованої сосни при їх гідратації за період з 18.09.2024 по 26.11.2024.

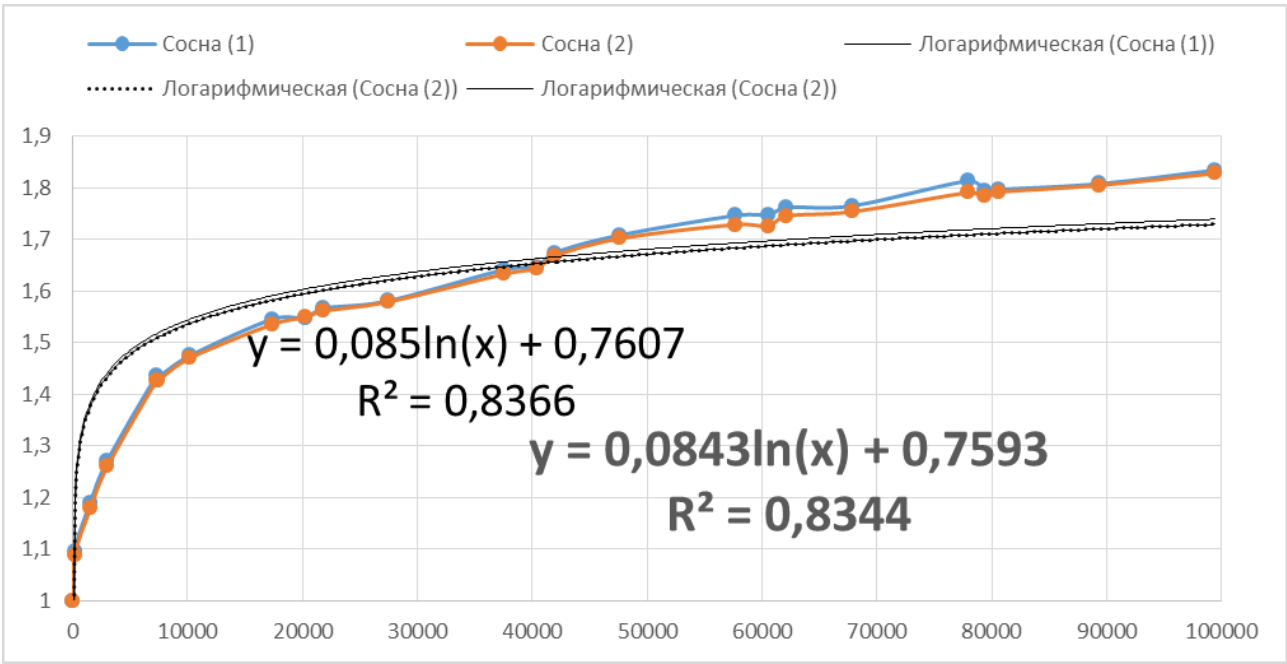


Рис. 19. Графік зміни безрозмірної ваги (г/г) зразків сосни при їх гідратації за період з 18.09.2024 по 26.11.2024.

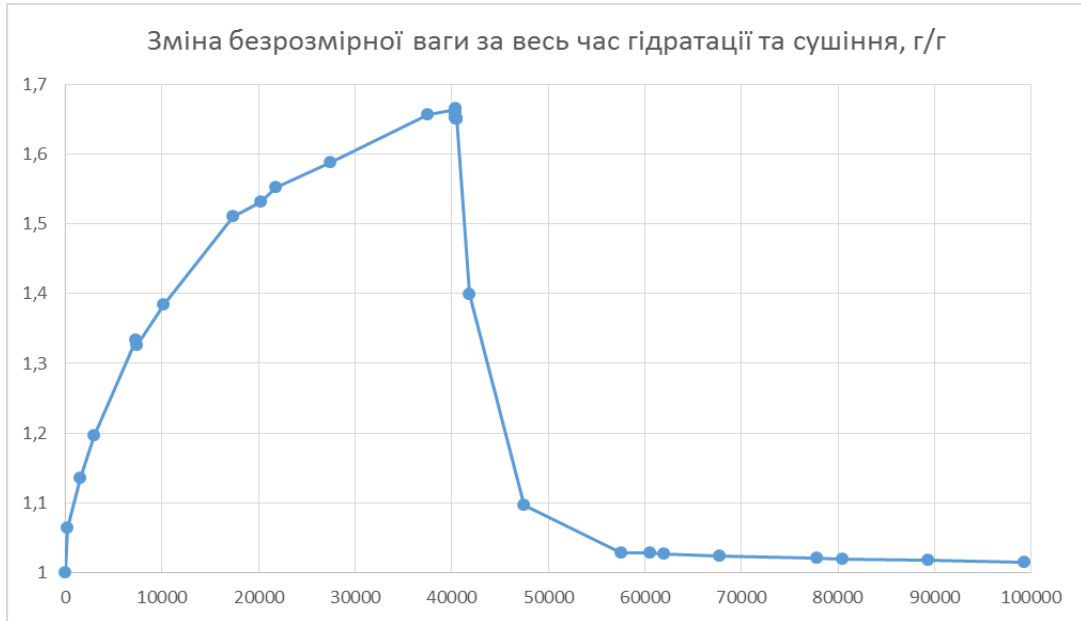


Рис. 20. Графік зміни безрозмірної ваги (г/г) зразків №6 термомодифікованої сосни при їх гідратації та сушінні (дегідратації).

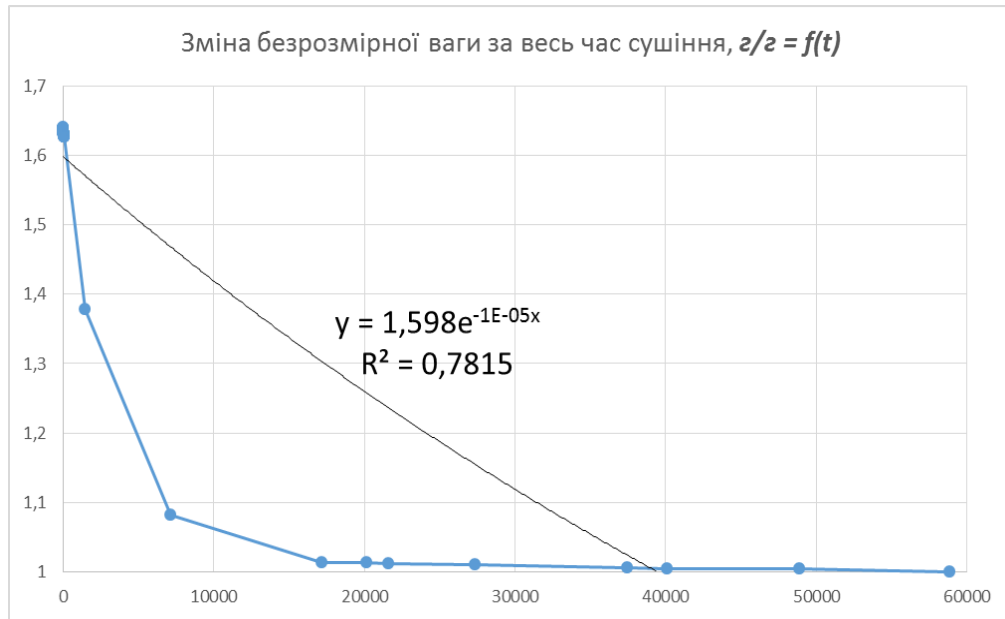


Рис. 21. Графік зміни безрозмірної ваги (г/г) зразків №6 термомодифікованої сосни за весь час сушіння (дегідратації).

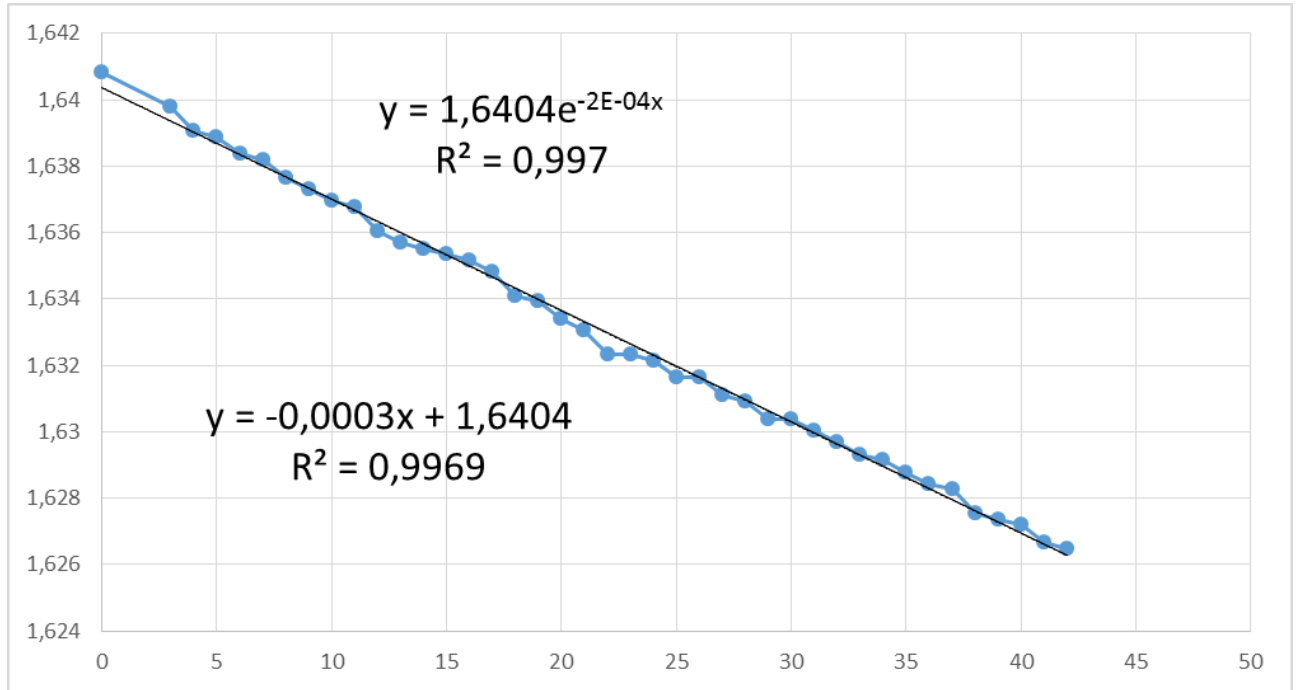


Рис. 22. Графік зміни безрозмірної ваги (г/г) зразків №6 термомодифікованої сосни в початковий час сушіння (дегідратації).

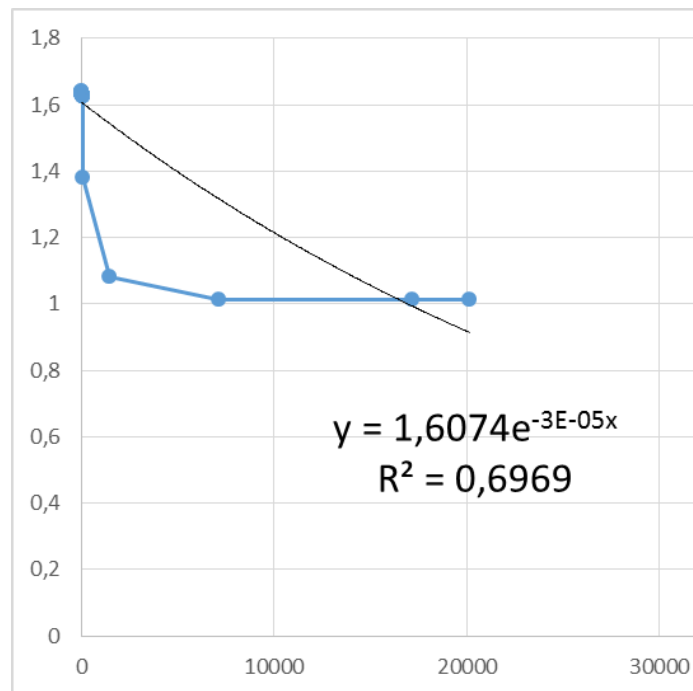


Рис. 23. Графік зміни безрозмірної ваги (г/г) зразків №6 термомодифікованої сосни в середині часу сушіння (дегідратації).

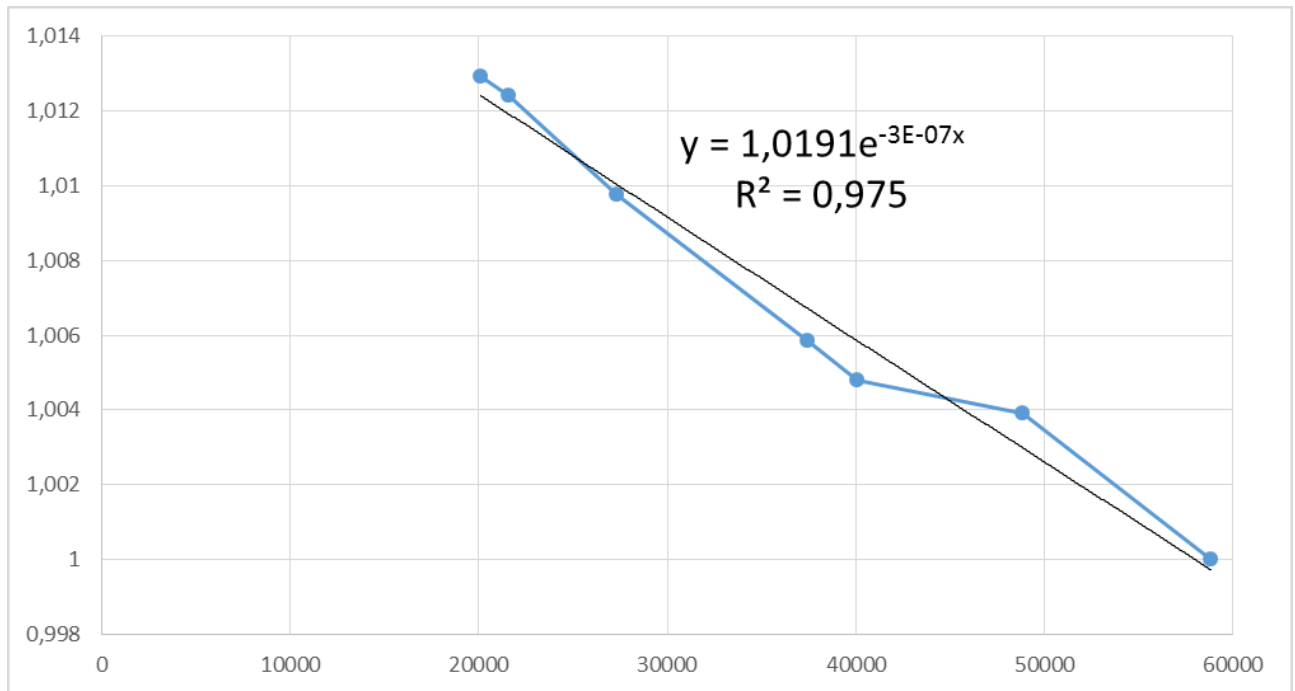


Рис. 24. Графік зміни безрозмірної ваги (г/г) зразків №6 термомодифікованої сосни в кінцевий період сушіння (дегідратації).

В даний час існує досить велика кількість регресійних моделей, які досить точно описують процес гідратації та просочення деревини. Вони створені з урахуванням практичних випробувань і добре описують швидкість процесу гідратації, але у вузькому діапазоні прийнятих величин змінних чинників [29]. Крім того вони не дають скільки-небудь прийнятної картини кінетики протікання самого процесу гідратації.

1 серія. Результати вимірювання ваги зразків при їх повному зануренні у воду представлені на Рис. 15. Графік зміни ваги зразків містить три ділянки. Перший – зміна ваги зразків при гідратації. Другий – при дегідратації.

На Рис. 18 та 21 представлено також рівняння регресії (лінія тренду). Найвищий коефіцієнт кореляції під час виборів лінії тренду виявився в логарифмічній кривій. Так, на першій ділянці він склав, у середньому для ТМДС: $R^2 = (0,7314+0,7461+0,7519)/3=0,7455$, тоді як у сосни $R^2 = (0,8366+0,8344)/2=0,8355$, для рівняння регресії в координатах: безрозмірна вага (CA) – час (t):

$$CA(t) = a \ln(t) + b \quad (8)$$

Характер лінії регресії як логарифмічної залежності відбиває швидкість зміни ваги зразка, тобто інтенсивність гідратації. Це означає, що коефіцієнт, що стоїть перед логарифмом часу, є показник швидкості гідратації. Дійсно продиференціювавши ліву та праву частину рівняння (8), ми визначимо швидкість зміни ваги зразка в часі:

$$d(CA(t))/dt = d(a \ln(t) + b)/dt = a/t$$

При цьому постійна b не характеризує кінетику процесу, а залежить лише від того, в якій системі координат визначається величина вологості (вміст води). Тобто залежить від того, якою формулою визначається вологість (абсолютна чи відносна).

Таке розуміння рівняння регресії у вигляді математичної моделі процесу гідратації дає можливість порівнювати процеси просочення, що відбуваються в різних умовах і для різних порід.

Виходячи з аналізу рівнянь регресії отриманих на першій ділянці можна зробити висновок про те, що швидкість гідратації у ТМДС більша ніж у сосни і становить для ТМДС: $V(ТМДС) = (0,1231+0,1188+0,1027)/3 = 0,1149$ і $V_{сосни} = (0,085+0,0843)/2 = 0,085$ відповідно при температурі води 20 град. Тобто швидкість гідратації ТМДС більша ніж звичайної сосни в $0,1149/0,085 = 13,5$ разів.

2 серія. Результати другої серії (дегідратації) представлені другою ділянкою кривої, Рис. 21. Рівняння регресії, яке найбільш повно описує дану криву це експонента, рівняння якої в загальному вигляді може бути представлене таким чином:

$$CA(t) = CA_0 e^{kt} \quad (9)$$

При цьому k може бути як більше, так і менше нуля. Причому передекспоненційний множник CA_0 дорівнює значенню $CA(t)$ при $t = 0$, тобто початку процесу дегідратації. Значення CA_0 залежить від вибору системи координат, в яких визначається величина вологості і ніяк не характеризує

кінетику (швидкість) процесу, а лише визначає його початкові умови. Визначимо швидкість процесу:

$$\frac{d(M(t))}{dt} = \frac{d(M_0 e^{kt})}{dt} = M_0 k e^{kt} \quad (10)$$

Швидкість дегідратації ТМД сосни різна на різних його часових інтервалах. Як впливає з рис. можна констатувати, що в середньому рівняння сушіння на всьому її протязі від 0 до 60000 хв може бути з великою достовірністю описано такою моделлю (рівнянням регресії з високим коефіцієнтом кореляції):

$$CA(t) = CA_0 e^{kt} = 1,598 e^{-0,00005t}$$

при високих коефіцієнтах кореляції у всіх випадках.

На початковій ділянці сушіння від 0 до 42 хв. (Рис.) рівняння має вигляд:

$$CA(t) = CA_0 e^{kt} = 1,6074 e^{-0,0002t}.$$

Тобто швидкість сушіння в $0,0002/0,00005 = 4$ рази вище середній.

В інтервалі від 42 хв до 2000 швидкість сушіння $k = -0.00003 [gg^{-1}/xv]$.

В інтервалі від 2000 хв до 6000, $k = 0.0000003 [gg^{-1}/xv]$.

Висновки за 1 серії. Швидкість гідратації павловнії вище за швидкість гідратації сосни при температурі 20 градусів Цельсія.

Висновки з 2 серії. Швидкості дегідратації павловнії та сосни відрізняються незначно при $T = 20^{\circ}C$, що може бути важливим аргументом на користь того, що сушіння обох порід можна вести одночасно в одній і тій же камері. Це дозволяє покращити логістику виробництва.

Високі значення коефіцієнтів кореляції рівнянь регресії як із гідратації, і при дегідратації підтверджують нашу гіпотезу у тому, що це процеси є кінетичними процесами першого порядку. Тобто процес можуть бути описані (змодельовані) у вигляді звичайних диференціальних рівнянь першого порядку:

$$\frac{d(M(t))}{dt} = kM(t).$$

Аналіз результатів експериментів дозволяє отримати достовірні дані про кінетику фізико-хімічних процесів, що відбуваються при цьому. З погляду хімії можна говорити про швидкість хімічних реакцій (макрокінетики), а з погляду фізики можна говорити про те, яким чином вода проникає в деревину за рахунок дифузії, капілярного чи іншого тиску.

Аналіз кривої насичення деревини підтверджує нашу гіпотезу про те, що швидкість гідратації деревини набагато більше на початку процесу. Це пов'язано з одночасним насиченням мікро та макрокапілярів. При досягненні мікрокапілярів рівноважної вологості насичення стінок ксилеми (мікрокапіляр) припиняється, тому загальна швидкість насичення знижується.

Таким чином, S – образна крива – це характерна особливість кінетики процесів із насиченням. Вона ще раз підтверджує нашу гіпотезу про те, що процес гідратації деревини відбувається у два етапи. Спочатку рідина заповнює собою переважно мікрокапілярну систему і тільки після цього починає заповнювати макрокапіляри.

Висновок. Ця серія ще раз підтвердила двоетапний характер процесу гідратації деревини, тоді як процес дегідратації відбувається в один етап.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ ТА РЕКОМЕНДАЦІЇ

1. Уперше отримані достовірні дані про гігроскопічні властивості термомодифікованої деревини сосни.
2. Уперше створена двостадійна кінетична модель гідратації термомодифікованої деревини сосни. Верифікація моделі шляхом проведення обчислювального та натурного експериментів показали, що модель адекватно описує динаміку гідратації термомодифікованої деревини сосни.
3. Результати експериментів з гідратації термомодифікованої деревини сосни з високим ступенем достовірності дозволяють зробити висновок, що кінетика процесу гідратації може бути описана логарифмічною залежністю. У цьому коефіцієнт кореляції загалом сягає 75%.
4. Кінетика дегідратації термомодифікованої деревини сосни з високим ступенем коефіцієнта кореляції (в середньому більше 80%) описується строго експоненційною залежністю. Це дозволяє з високою точністю моделювати, а значить і прогнозувати, технологічні процеси при застосуванні термомодифікованої деревини сосни.
5. Було визначено двоетапний характер процесу гідратації деревини, тоді як процес дегідратації відбувається в один етап.
6. Аналіз кривої насичення деревини підтверджує нашу гіпотезу про те, що швидкість гідратації деревини набагато більше на початку процесу. Це пов'язано з одночасним насиченням мікро та макрокапілярів. При досягненні мікрокапілярів рівноважної вологості насичення стінок ксилеми (мікрокапіляр) припиняється, тому загальна швидкість насичення знижується. S – образна крива – це характерна особливість кінетики процесів із насиченням. Вона ще раз підтверджує нашу гіпотезу про те, що процес гідратації деревини відбувається у два етапи.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Gerhards, C.C. Effect of moisture-content and temperature on the mechanical-properties of wood—An analysis of immediate effects. *Wood Fiber* 1982, 14, 4–36.
2. Armstrong, L.D.; Kingston, R.S.T. The effect of moisture content changes on the deformation of wood under stress. *Aust. J. Appl. Sci.* 1962, 13, 257–276.
3. Gibson, E.J. Creep of Wood—Role of Water and Effect of A Changing Moisture Content. *Nature* 1965, 206, 213–215. [CrossRef]
4. Tiemann, H.D. Effect of Moisture upon the Strength and Stiffness of Wood; Bulletin 70; US Department of Agriculture, Forest Service: Washington, DC, USA, 1906.
5. Markwardt, L.J.; Wilson, T.R.C. Strength and Related Properties of Woods Grown in the United States; US Department of Agriculture: Washington, DC, USA, 1935.
6. Hearmon, R.F.S.; Burcham, J.N. Specific heat and heat of wetting of wood. *Nature* 1955, 176, 978. [CrossRef]
7. Kühlmann, G. Untersuchung der thermischen Eigenschaften von Holz und Spanplatten in Abhängigkeit von Feuchtigkeit und Temperatur im hygroskopischen Bereich. *Holz Roh Werkst.* 1962, 20, 259–270. [CrossRef]
8. Sonderegger, W.; Hering, S.; Niemz, P. Thermal behaviour of Norway spruce and European beech in and between the principal anatomical directions. *Holzforschung* 2011, 65, 369–375. [CrossRef]
9. MacLean, J.D. Thermal conductivity of wood. *Heat. Pip. Air Cond.* 1941, 13, 380–391.
10. Zeller, S.M. Humidity in relation to moisture imbibition by wood and to spore germination on wood. *Ann. Mo. Bot. Gard.* 1920, 7, 51–74. [CrossRef]
11. Griffin, D.M. Water potential and wood-decay fungi. *Annu. Rev. Phytopathol.* 1977, 15, 319–329. [CrossRef]

12. Brischke, C.; Alfredsen, G. Wood-water relationships and their role for wood susceptibility to fungal decay. *Appl. Microbiol. Biotechnol.* 2020, 104, 3781–3795. [CrossRef]
13. Amidon, T.E.; Liu, S. Water-based woody biorefinery. *Biotechnol. Adv.* 2009, 27, 542–550. [CrossRef]
14. Liu, S.; Lu, H.; Hu, R.; Shupe, A.; Lin, L.; Liang, B. A sustainable woody biomass biorefinery. *Biotechnol. Adv.* 2012, 30, 785–810. [CrossRef]
15. Volbehr, B.F.K.J. Untersuchungen über die Quellung der Holzfaser. In *Philosophischen Fakultät*; Universität Kiel: Kiel, Germany, 1896; pp. 1–37.
16. Carrington, H. The elastic constants of spruce as influenced by moisture content. *Aeronaut. J.* 1922, 26, 462–471.
17. Englund, E.T.; Thygesen, L.G.; Svensson, S.; Hill, C.A.S. A critical discussion of the physics of wood-water interactions. *Wood Sci. Technol.* 2013, 47, 141–161. [CrossRef]
18. Venkateswaran, A. Sorption of aqueous and nonaqueous media by wood and cellulose. *Chem. Rev.* 1970, 70, 619–637. [CrossRef]
19. Skaar, C. Theories of water sorption by wood. In *Wood-Water Relations*; Springer: Berlin/Heidelberg, Germany, 1988; pp. 86–121.
20. Siau, J.F. Basic Wood-Moisture Relationships. In *Transport Processes in Wood*; Springer: Berlin/Heidelberg, Germany, 1984; pp. 1–34.
21. Hawley, L.F. Wood-Liquid Relations; Technical Bulletin 248; US Department of Agriculture: Washington, DC, USA, 1931; pp. 1–34.
22. Tarkow, H. Interaction of Moisture and Wood; Report No. 2198; US Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory: Madison, WI, USA, 1960; pp. 1–8.
23. Wangaard, F.F.; Wengert, E.M.; Mitchell, P.H.; Rosen, H.N.; Skaar, C.; Simpson, W.T.; Beall, F.C.; Spalt, H.A.; Arganbright, D.M.; Stewart, H.A.; et al. Proceedings of the Wood Moisture Content—Temperature and Humidity Relationships Symposium, Blacksburg, Virginia, 29 October 1979;

- Rosen, H.N., Simpson, W.T., Wengert, E.M., Eds.; USDA Forest Service, Forest Products Laboratory: Madison, WI, USA, 1979.
24. Stamm, A.J. Wood and Cellulose Science; The Ronald Press Company: New York, NY, USA, 1964.
25. Glass, S.V.; Zelinka, S.L. Chapter 4. Moisture Relations and Physical Properties of Wood. In Wood Handbook. Wood as an Engineering Material; FPL-GTR-282; Ross, R.J., Ed.; U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory: Madison, WI, USA, 2021.
26. Фенгель Д. Древесина (химия, ультраструктура, реакции): Пер. с англ. Фенгель Д., Вегенер Г. М.: Лесная пром-сть, 1988.
27. Білей П.В. Сушіння та захист деревини / П.В.Білей, В.М.Павлюст.- Львів: 2008.- 312 с.
28. Thybring, E.E.; Fredriksson, M.; Zelinka, S.L.; Glass, S.V. Water in Wood: A Review of Current Understanding and Knowledge Gaps. *Forests* 2022, 13, 2051. <https://doi.org/10.3390/f13122051>
29. Пінчевська О.О., Горбачова О.Ю. Захисне оброблення дерев'яних конструкцій. - К.: 2013 р. - 191 с.
30. Вітій А., Б. Маросвельдь, 2012: A fajszi kísérleti Paulownia ültetvények újabb kutatási eredményei (Управління екологічними ресурсами та охорона та екологічна співпраця), Дослідницький центр Non-profit Ltd, Шопрон (в Угорщині).
31. Walker, J.C.F., Butterfield, B.G., 1996: Зміна основної щільності в межах молодої деревини ялини Сітка (*Picea sitchensis*), *New Zealand Journal of Forestry* 40(4): 34–40.
32. Zhang, S. Y. (1997): Взаємозв'язок питомої ваги деревини та механічних властивостей на рівні виду, *Wood Science and Technology* 31(3):181-191.
33. Мамонтов Е.А. Проектирование технологических процессов изготовления изделий деревообработки: учебное пособие / Е.А. Мамонтов, Ю.Ф. Стрежнев. – Санкт-Петербург: «ПрофиКС», 2006. – 581с.

34. Гончаров Н.А., Башинский В.Ю., Буглай Б.М. Технология изделий из древесины. – М.: Лесная промышленность, 1990. – 528 с.
35. ГОСТ 1146-80. Шурупы с полупотайной головкой // ИПК издат. стандартов. М.: 1982, 4 с.
36. Прокопович Б.В. Основи проектування столярно-меблевих виробництв: Навч. посібник / Б. В. Прокорович - К.: ІЗМН Міносвіти України. 1998. – 303 с.
37. Мец В. О. Економічний аналіз фінансових результатів та фінансового стану підприємства: Навч. посібник. / В. О. Мец – К.: КНЕУ, 1999. – 132 с.
38. Баканов М. И. Теория экономического анализа / Баканов М.И., Шеремет А. Д. – М.: Финансы и статистика, 1997. – 416 с
39. Шеремет А. Д. Теория экономического анализа: Учебник. / А.Д. Шеремет – М.: Инфра-М, 2002. – 333 с.
40. Житна І.П. Економічний аналіз господарської діяльності підприємств / І. П. Житна – К.: Вища шк., 1992. Мец В. О. Економічний аналіз фінансових результатів та фінансового стану підприємства: Навч. посібник. / В. О. Мец – К.: КНЕУ, 1999. – 132 с.
41. Кисорець І.П., С.М. Кульман Дослідження кінетики гідратації та дегідратації деревини сосни та павловнії. Всеукраїнська науково-практична конференція здобувачів вищої освіти та молодих вчених «Стан і майбутнє лісового господарства, деревообробки та землевпорядкування» 15–16 листопада 2022 року Харків
42. Кисорець І.П. Модель динаміки гідратації деревини сосни та павловнії. Ліс, наука, молодь: матеріали ІХ Всеукр. наук.-практ. конф. (24 листопада 2022 р.). – Житомир: Поліський національний університет, 2022. – 257 с.
43. Кисорець І.П., Кульман С.М. Гідратація та дегідратація деревини сосни та павловнії при гідротермічній обробці. Сучасні проблеми лісового господарства та екології: шляхи вирішення. Матеріали міжнародної науково-практичної конференції (7-8 жовтня 2022 року, м. Житомир). – Житомир: Поліський

- національний університет, 2022 – 276 с.44. Пижурин А.А. Исследование процессов деревообработки. – М: Лесная промышленность, 1984 – 232с.
45. Билей П.В., Никитюк Л.А. и др. Основы научных исследований технологических процессов д/о. Конспект лекцій, Львів, 1994.
46. Л.О.Никітюк. Наукові дослідження в д/о. Львів: 1994; 1995; 1997.
47. Франк-Каменецкий Д.А. Основы макрокинетики. Диффузия и теплопередача в химической кинетике: Учебник-монография / Д.В. Франк-Каменецкий. – 4-е изд. – Долгопрудный: Издательский дом «Интеллект», 2008. – 400 с.