

УДК 674.8

**В. Є. ВЕДЬ, А. М. МИРОНОВ****ДОСЛІДЖЕННЯ ЗВ'ЯЗКУ МІЖ СТРУКТУРОЮ ДЕРЕВИНИ ТА КІНЕТИКОЮ ПРОЦЕСУ ЇЇ СУШКИ**

В роботі вивчається вплив структури деревинної сировини на механізм протікання процесів її сушіння. У даній статті досліджено мікроскопічну будову деревини та визначено пористість матеріалу. Кінетика сушки розглядається на прикладі п'яти різних порід дерев – чотирьох листвяних та однієї хвойної. Проведено досліді щодо випаровування води з плоскої поверхні та за допомогою встановлення термопар оцінено межі прогріву підослідного матеріалу. Досліджено процес випаровування вологи для трьох груп зразків різних порід, обчислена швидкість протікання сушки, а також визначені основні фактори, що впливають на перебіг процесу. З'ясовано удаваний порядок реакції, яка відбувається під час сушіння. На підставі вищевикладеного робиться висновок щодо необхідності у диференціації методик сушіння початкової сировини у залежності від її типу.

**Ключові слова:** деревина, сушка, порода, структура, волога, реакція, температура, піроліз, швидкість процесу.

**Вступ.** Деревина, яка заготовлена у лісі, доставляється до відповідних підприємств водояним, залізничним або автомобільним транспортом. Найбільш економічним видом транспорту є сплав деревини за течією річок або озер на баржах. Збереження деревинної сировини відбувається на лісових складах, які являють собою відкритий майданчик, максимально рівний та нерідко розташований поряд із водоймами або уздовж берегової лінії [1].

Таким чином, деревина завжди містить вологу. За вологістю вона підрозділяється на три групи: повітряно-суху (20–25%), напівсуху (26–50%) та сиру (з більшим вмістом вологи). Сушка сировини є початковим етапом для процесу піролізу. Головна мета сушки полягає у перетворенні деревини з природної сировини на промисловий матеріал з покращеними технологічними властивостями. Задля отримання вірної картини протікання усього комплексу процесів, пропонується розглянути цю початкову стадію. Вихід вугілля з деревини хвойних порід трошки більше, ніж з листвяних порід, проте якість вугілля з листвяних порід вище [1].

Кінцева вологість деревини після сушки, окрім виключно важливого впливу на технологічні процеси піролізу (продуктивність апаратів, якість вугілля та рідких продуктів піролізу, об'єм стічних вод тощо), помітно впливає на витрату теплової енергії при піролізі деревини [2].

**Формулювання цілей статті, постановка проблеми.** Ціль цієї роботи – дослідити процес випаровування вологи зі зразка деревини різних порід, визначені основні фактори, що впливають на перебіг процесу, з'ясований порядок реакції, яка відбувається, та обчислена швидкість протікання сушки.

Прийнято вважати, що найбільш економічно доцільним є піроліз деревини вологістю 15–25%, але реальна вологість висушеної деревини коливається у значно більш широких межах. Під час камерної сушки терміни висихання деревини порівняно невеликі (декілька годин), крім того при кваліфікованому проведенні процесу є можливість отримати технологічну сировину будь-якої кінцевої вологості.

Одним з основних чинників, які впливають на продуктивність підприємства з піролізу деревини та собівартість отриманої продукції є вологість сировини, яка йде на переробку. Чим більш сухою є деревина, тим швидше відбувається процес піролізу, підви-

щується кислотність жижики та, відповідно, зменшуються теплові витрати на її переробку та утилізацію стічних вод. Саме тому інтенсифікація процесу сушки є першочерговим завданням для підвищення ефективності роботи піролізних підприємств.

**Опис процесу.** Сушка – це процес видалення вологи з матеріалу шляхом її випаровування. Видаляється, як правило, волога, зв'язана з деревиною адсорбційним та осмотичним чином, а також механічно (волога макро- та мікрокапілярів) [1, 2].

Під час сушки деревини волога внутрішніх шарів перед тим, як випаруватись, повинна переміститися до поверхні. Швидкість її переміщення всередині деревини у багато разів менша за можливу швидкість її випаровування з поверхні. Саме тому поверхневі шари деревини висихають швидше, ніж внутрішні [2].

Через відставання процесу переміщення вологи з внутрішніх областей деревини у порівнянні з процесом випаровування її з поверхні утворюється значна різниця (перепад) вологості між внутрішніми та поверхневими шарами деревини. Чим більший перепад вологості у деревині, тим більш інтенсивне у ній переміщення вологи. Другим збудником переміщення вологи всередині матеріалу є різниця температур між внутрішніми та зовнішніми шарами матеріалу, що висушується [2].

У даній статті розглядатиметься процес сушіння деревинної сировини при температурах, що не перевищують 150 °С, та до кінцевої вологості, величина якої є межевою для процесів сушки та процесу початку власне піролізу.

**Матеріали досліджень.** Наразі для сушіння деревини на піролізних підприємствах використовується атмосферна (природна) та камерна (штучна) сушка.

Для дослідження було обрано зразки п'яти порід дерев: бук, береза, дуб, сосна та червоне дерево. Наведено дані щодо одного зразку листвяної породи та одного зразку хвойної (берези та сосни відповідно).

Задля отримання цілковитого уявлення про процес було проведено три серії дослідів (кожна з кількома дублюючими експериментами для уточнення даних):

1) обробка цехового технологічного матеріалу, який пройшов первинну підготовку для столярних цілей (нижчий рівень вологості);

2) обробка сирого матеріалу, отриманого безпосередньо з відкритого повітря (середній рівень вологості);

3) обробка цехового технологічного матеріалу, який попередньо був штучним чином максимально насичений вологою (найвищий рівень вологості).

Крім того, були здійснені попередні заходи: під мікроскопом досліджені внутрішні структури зразків деревини, проведені досліди випаровування води з плоскої поверхні, а також оцінені межі прогріву піддослідного матеріалу за допомогою встановлення термопар, про все це йтиметься нижче.

**Результати досліджень.** Очевидно, що суттєвий вплив на перебіг процесу випаровування рідини з товщі деревини має її структурна будова. Деревина складається з кліток, які здебільшого являють собою порожні трубки різного діаметру. Порожнини клітин, поєднані між собою порами (рис. 1), утворюють у деревині макрокапілярну систему.

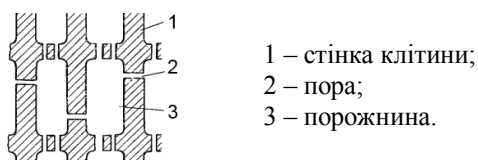


Рис. 1 – Схема макрокапілярної структури деревини

Відомо, що стінки клітин мають волокнисту будову. За допомогою мікроскопу, обладнаного камерою, було отримано фотознімки внутрішніх структур для кожної породи дерев. Це дослідження підтвердило уявлення про те, що сорбційна ємність деревини для різних порід відрізняється через структурні розбіжності. У якості найбільш цікавих зразків наведемо приклад берези та сосни (рис. 2 та 3).

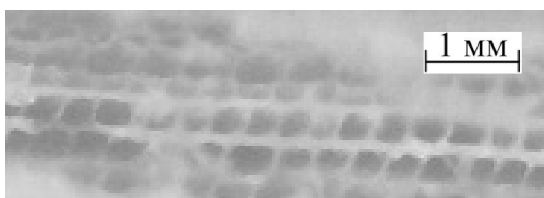


Рис. 2 – Внутрішня структура берези

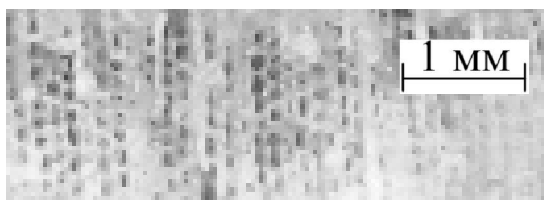


Рис. 3 – Внутрішня структура сосни

Сосуди зустрічаються тільки у листяних порід. Як можна побачити на першому знімку, у берези чітко вирізняються окремі волокна, які рівномірно розташовані уздовж зразка деревини. Відстань між структурними одиницями дозволяє накопичувати та утримувати достатньо велику кількість вологи за умов стабільної температури навколишнього середовища. Натомість смоляні ходи зустрічаються виключно у хвойних порід.

Вони представляють собою міжклітчасті канали, заповнені смолою. Наведений на знімку розріз наочно демонструє поздовжні волокнисті, що перетягнуті поперечними, що дає змогу побачити сітчасту систему, яка більше нагадує бджолині стільники. Така структура довше набирає, але й довше утримує вологу, що продемонстрували результати наступних експериментів.

Якщо загальний об'єм шматочка деревини прийняти за 100%, то співвідношення між об'ємом стінок клітки та об'ємом порожнин клітки буде, яке наведено у табл. 1.

Таблиця 1 – Пористість деревини

Порода	Стінок клітки, % об'єму	Порожнин клітки, % об'єму
Береза	39	61
Сосна	33	67

Зрозуміло, що пористість впливає на питому вагу, гігроскопічність, теплопровідність та на інші фізичні властивості деревини.

Дослідження процесу випаровування води просто з плоскої поверхні проводилося для виявлення кореляції між параметрами часу сушки та кількістю вологи у вихідному матеріалі. Далі необхідно було визначити кількісну характеристику вмісту вологи у зразку.

За температури 150 °C зразок вагою 1 грам піддавався сушці та через фіксовані інтервали часу, однакові за величиною, знімалися показники зменшення маси зразку. Його кінцева вага дорівнює масі сухої деревини, а маса, що випарилася, – кількості води у складі вихідної одиниці зразка та відсотку пористості цього зразка.

Подібний експеримент фактично являє собою дослідження кінетики сушки – тобто він встановлює зв'язок між зміненням вологості матеріалу  $\omega^c$  у часі та іншими параметрами процесу:  $\omega^c = f(\tau)$ .

Універсальна відсоткова величина вмісту вологи у матеріалі від початкової маси:

$$w_{\%} = \frac{G_{\text{поч.}} - W_i}{G_{\text{поч.}}} \cdot 100 \%,$$

де  $G_{\text{поч.}}$  – вага зразку перед початком сушки;

$W_i$  – кількість вологи у певний момент часу,

$$W_i = \frac{Y_i \cdot G_{\text{поч.}}}{100};$$

$Y_i$  – відсоток вологи від початкової ваги зразку.

Поступовість випаровування вологи зі зразку деревини розглядається на прикладі одного шматку листяної та одного шматку хвойної породи, кожен з яких має найменший (цеховий підсушений) та найбільший (цеховий насичений) рівень вологості (рис. 4–7).

Отримані кінетичні залежності сушки деревини різних порід дозволяють апроксимувати їх диференціальними рівняннями n-ного порядку [3], для яких була проведена ідентифікація параметрів:

$$-\frac{dC_A}{dt} = nkC_A^n;$$

$$C_A^{1-n} - C_{A0}^{1-n} = (n-1) \cdot nkt.$$

Звідси виразимо  $n$ .

$$\ln C_{A_n}^{1-n} = (1-n) \cdot \ln C_{A_0};$$

$$n = 1 - \ln \frac{C_{A_n}^{1-n}}{C_{A_0}}$$

Доведено, що варіювання величини  $n$  не має суттєвого впливу на вигляд функції для усіх порід досліджуваної деревини при значеннях  $n \sim 1,05$ . Роби-мо висновок про те, що відбувається реакція першого порядку за загальною формулою  $y=ax+b$ . Наведемо приклад однієї функції – тут функції для сосни з меншою вологістю – рис. 8.

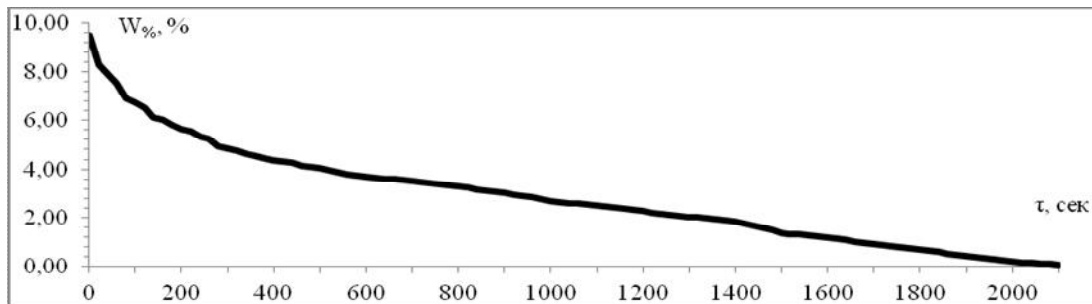


Рис. 4 – Кінетика сушки берези з найменшим рівнем вологості (9,3%)

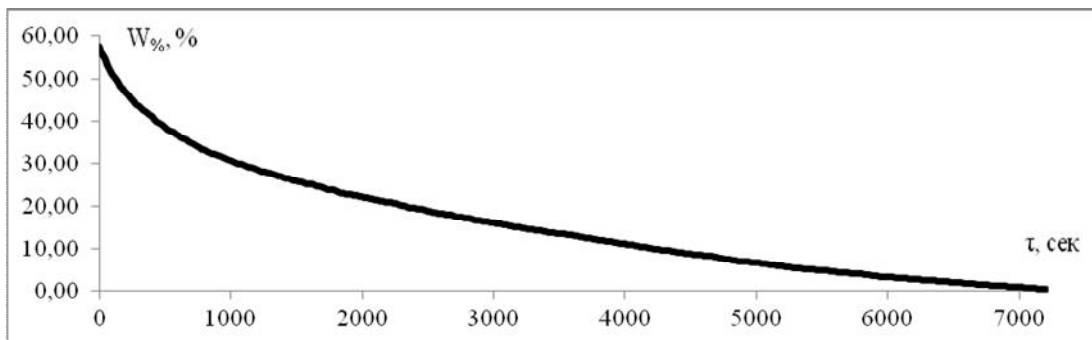


Рис. 5 – Кінетика сушки берези з найбільшим рівнем вологості (57,7%)

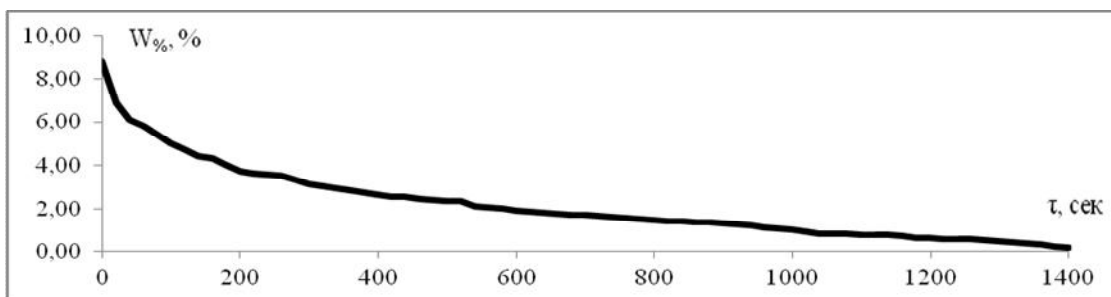


Рис. 6 – Кінетика сушки сосни з найбільшим рівнем вологості (8,8%)

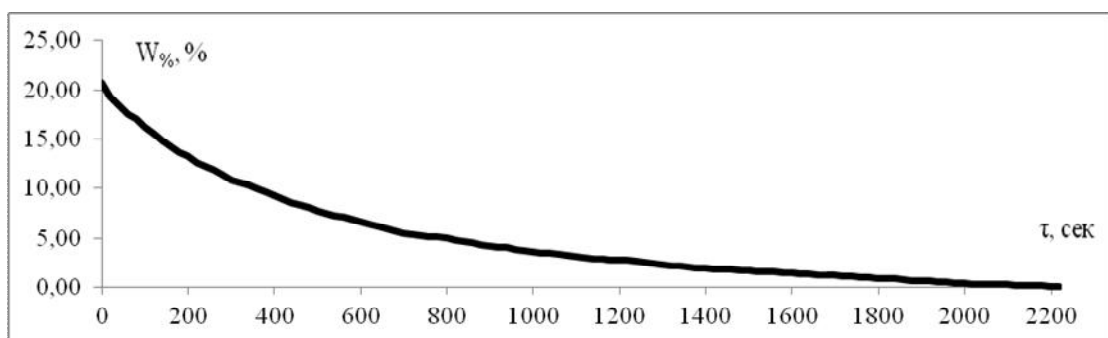


Рис. 7 – Кінетика сушки сосни з найбільшим рівнем вологості (20,7%)

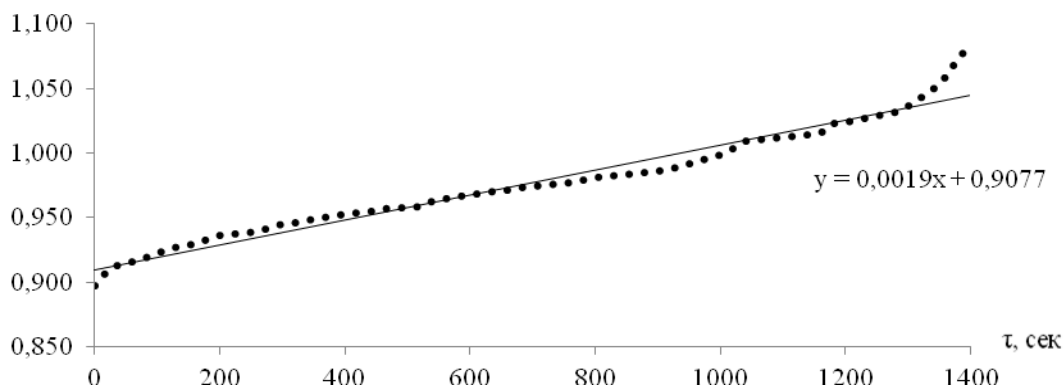


Рис. 8 – Функція пошуку порядку реакції на прикладі сушки зразку сосни

Ця функція може бути лінеаризована за допомогою виразу  $y=0,001x+0,907$ .

Подібним чином можна лінеаризувати всі отримані криві та для реакцій першого порядку використати рівняння кінетики сушки. Швидкість являє собою функцією часу, тобто можна скористатись наступним перетвореним рівнянням [3]:

$$-\int_{w_{\%0}}^{w_{\%i}} \frac{dw_{\%}}{w_{\%}} = k \int_0^t dt;$$

$$-\ln\left(\frac{w_{\%i}}{w_{\%0}}\right) = k \cdot t.$$

Швидкість процесу:

$$v = -\ln\left(\frac{w_{\%i}}{w_{\%0}}\right).$$

На рис. 9–12 зображені криві швидкостей сушки для тих самих зразків, які наведено вище. Всі криві мають однорідний вигляд та на них відсутні різкі зміни.

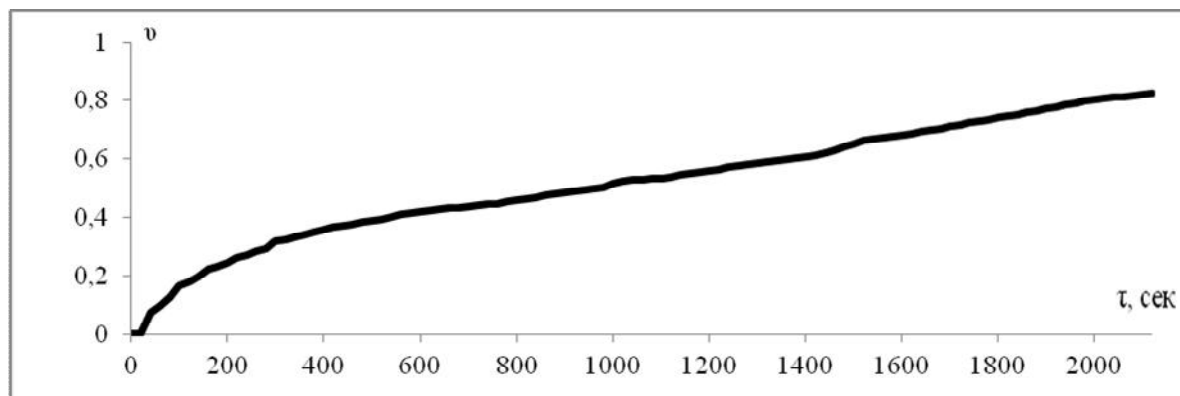


Рис. 9 – Швидкість сушки берези з найменшим рівнем вологості

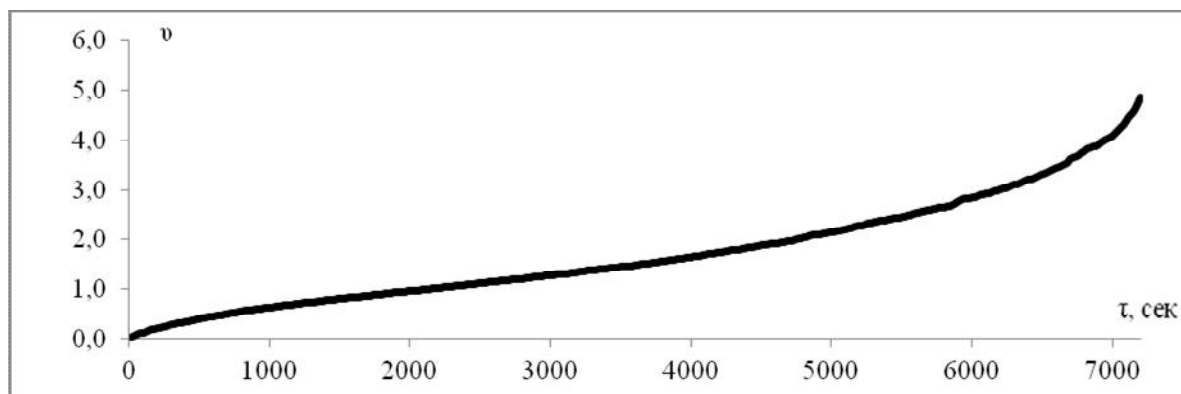


Рис. 10 – Швидкість сушки берези з найбільшим рівнем вологості

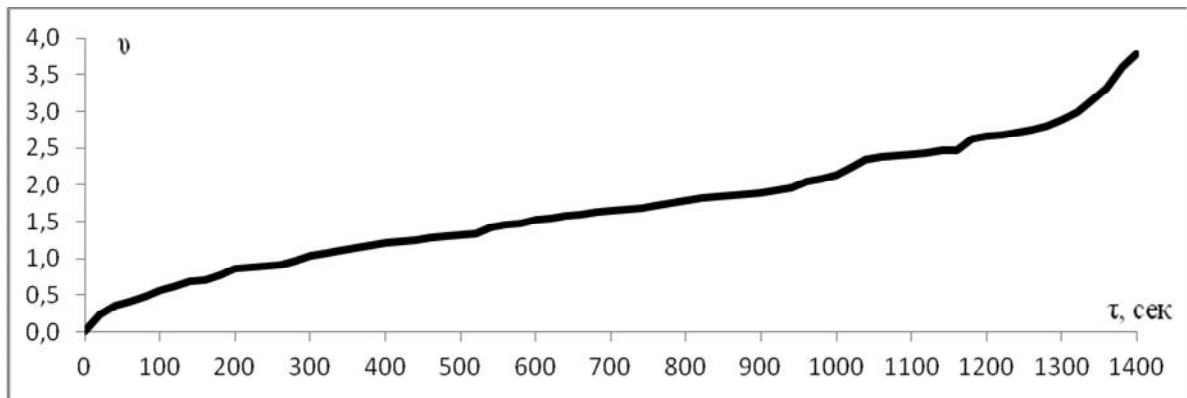


Рис. 11 – Швидкість сушки сосни з найменшим рівнем вологості

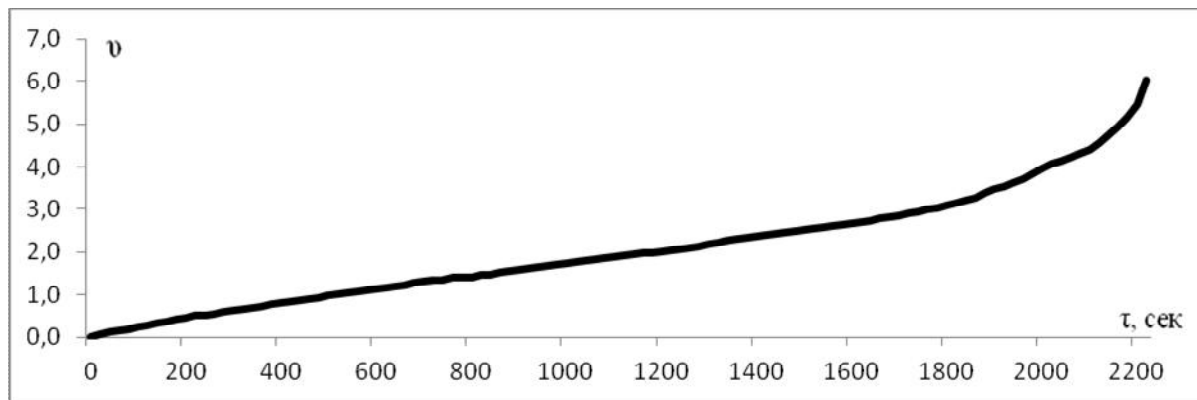


Рис. 12 – Швидкість сушки сосни з найбільшим рівнем вологості

Варіюючи величиною, обчислимо  $k$  :

$$k = \frac{t \cdot g \cdot \alpha}{n \cdot (n - 1)}$$

В результаті ми отримаємо сімейство кривих, що мають різний кут нахилу. Після підрахунків співвідношення отриманих значень здебільшого підтверджують попередні висновки щодо вологосприйнятливості, засновані на вивченні структури деревини та кривих кінетики сушки. Виходячи з вищевикладеного, є очевидною необхідність у диференціації методики сушіння початкової сировини.

**Висновки.** Сушка сировини є початковим етапом для процесу піролізу. У даній статті було вивчено структуру деревини, досліджено процес випаровування вологи зі зразків різних порід, визначені основні фактори, що впливають на перебіг процесу, з'ясований порядок реакції, яка відбувається, та обчислена швидкість протікання сушки. Процес має

розглядатися без відриву від подальшої переробки сировини на піролізному підприємстві.

**Список літератури:** 1. *Ковернинский И.И.* Комплексная химическая переработка древесины: Учебник для вузов / *И.И. Ковернинский, В.И. Комаров, С.И. Третьяков, Н.И. Богданович, О.М. Соколов и др.* – Архангельск: Издательство АГТУ, – 2002. – 347 с. 2. *Выродов В.А.* Технология лесохимических производств: Учебник для вузов / *В.А. Выродов, А.Н. Кислицын, М.И. Глухарёва и др.* – М.: Лесная промышленность, 1987. – 352 с. 3. *Царева З.М.* Основы теории химических реакторов / *З.М. Царева, Л.Л. Товажнянский, Е.И. Орлова* – Харьков: ХГПУ, – 1997. – 624 с.

**Bibliography (transliterated):** 1. *Koverninskiy I.I.* Kompleksnaya himicheskaya pererabotka drevesyiny: Uchebnik dlya vuzov / *I.I. Koverninskiy, V.I. Komarov, S.I. Tretyakov, N.I. Bogdanovich, O.M. Sokolov i dr.* – Arhangelsk: Izdatelstvo AGTU, – 2002. – p.347. 2. *Vyirodov V.A.* Tehnologiya lesohimicheskikh proizvodstv: Uchebnik dlya vuzov / *V.A. Vyirodov, A.N. Kislitsyin, M.I. Gluharyova i dr.* – M.: Lesnaya promyshlennost, 1987. – p. 352. 3. *Tsareva Z.M.* Osnovy teorii himicheskikh reaktorov / *Z.M. Tsareva, L.L. Tovazhnyanskiy, E.I. Orlova* – Harkov: HGPU, – 1997. – p. 624.

Надійшла (received) 31.03.2015

#### Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

**Валерій Євгенович Ведь**, доктор технічних наук, професор, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», 0978326949; ved@kpi.kharkov.ua,

**Антон Миколайович Миронов**, аспірант, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», 0934063035; 380934063035@ya.ru.

**Valery Evhen'evych Ved**, Doctor of Technical Sciences, professor, National technical university "Kharkiv polytechnic university", 0978326949; ved@kpi.kharkov.ua,

**Anton Nikolaevych Myronov**, postgraduate, National technical university "Kharkiv polytechnic university", 0934063035; 380934063035@ya.ru.