

УДК 614.842

Цапко Ю.В., канд. техн. наук, старш. наук. співроб.,
Київський НДІ судових експертиз, м. Київ

ДОСЛІДЖЕННЯ УМОВ ЗНИЖЕННЯ ІНТЕНСИВНОСТІ БІОРУЙНУВАННЯ ЦЕЛЮЛОЗОВІСНИХ МАТЕРІАЛІВ

Мікроорганізми (гриби), які утворюються на поверхні целюлозовмісних матеріалів, наприклад, деревини, виділяють ферменти, які з часом перетворюють складові матеріалу в більш доступні органічні з'єднання [1]. Кінцевими продуктами є вода й діоксид вуглецю та руйнування органічної маси, змінюється анатомічна будова матеріалу та фізико-механічні властивості. Активна життєдіяльність мікроорганізмів можлива лише при підвищеній вологості та за додатної температури, тому при експлуатації виробів з целюлозовмісних матеріалів за наявності таких умов, необхідно проводити захисні заходи, а саме оброблення спеціальними антисептичними засобами [2].

Для вирішення задачі підвищення працездатності і довговічності застосування вогнебіезахищених целюлозовмісних матеріалів необхідно здійснити моделювання процесів їх старіння і біоруйнування. Виявлення пошкоджень на ранніх стадіях або передумов до них, а також передбачення їх розвитку та прогнозування, дозволить вірно оцінити умови та строки експлуатації виробів, визначити ефективність застосування методів та засобів захисту і прийняти рішення про їх удосконалення.

Приймаємо, що інтенсивність біоруйнування об'єму матеріалу в процесі біохімічного обміну активними мікроорганізмами рослинної сировини пропорційна розмірам (чисельності) їхньої популяції (N) в частці об'єму матеріалу (X), а саме:

$$I = \psi_0 \cdot \frac{N}{V} \cdot X \quad (1)$$

де ψ_0 - потужність зміни питомої маси матеріалу в результаті життєдіяльності окремого мікроорганізму, *кг/доба*.

N - чисельність популяції активних мікроорганізмів в об'ємі матеріалу;

V - об'єм матеріалу, *м³*;

X - частки об'єму матеріалу, що приймає участь у біохімічному обмінному процесі.

Динаміка зміни концентрації мікроорганізмів в целюлозовмісному матеріалі визначається питомою швидкістю росту [3, 4] та чисельністю і в загальному випадку описується наступною залежністю:

$$\frac{dN}{dt} = \mu \cdot N \quad (2)$$

де μ - питома швидкість росту мікроорганізмів.

В більшості випадків питома швидкість росту мікроорганізмів в матеріалі залежить від концентрації лімітуючого субстрату тобто функціонально залежить від біоруйнування і може бути наведена наступними рівняннями:

$$\mu = \alpha - \beta \cdot R, \quad (3)$$

де α – гранично максимальна питома швидкість росту мікроорганізмів,
 β – питома швидкість зменшення чисельності мікроорганізмів,
 R – функція біоруйнівних речовин.

В свою чергу функція біоруйнування, значення якого дорівнює частці мікроорганізмів, що припинили життєдіяльність в результаті несприятливих умов (накопичення продуктів розкладу ферментної діяльності, застосування біозахисних препаратів, підвищення температури), описується диференціальним рівнянням [3, 5]:

$$\frac{dR}{dt} = \gamma \cdot N \quad (4)$$

де γ – коефіцієнт зменшення популяції.

Визначимо кількість органічної речовини X , тобто частки об'єму матеріалу, що приймає участь у біохімічному обмінному процесі, за диференціальним рівнянням [3]:

$$\frac{dX}{dt} = k \cdot (a - X) \cdot N \quad (5)$$

де k – коефіцієнт проникності мікроорганізмів в матеріал;
 a – загальна частка органічної речовини.

В початковий момент часу ($t = 0$) кількості активних мікроорганізмів в органічній масі $N(0) = N_0$, але за літературними даними [3] ця функція обов'язково має точку глобального максимуму (максимального з можливої кількості мікроорганізмів) $t = t_m$, у якій $N(t_m) = N_m$ [6], яку і необхідно визначити.

Нижче наведено рішення задачі динаміки розмірів популяції мікроорганізмів у целюлозовмісному матеріалі.

Проведено математичне моделювання процесу біоруйнування та отримано залежність динаміки популяції мікроорганізмів в об'ємі рослинної сировини, в тому числі біо захищеної (рис. 1):

$$N = \frac{N_m}{\operatorname{ch}^2 \left[\left(1 - \frac{t}{t_m} \right) \cdot \frac{\Delta}{2} \right]} \quad (6)$$

На рис. 1 приведено динаміку популяції мікроорганізмів в об'ємі рослинної сировини, в тому числі біо захищеної.

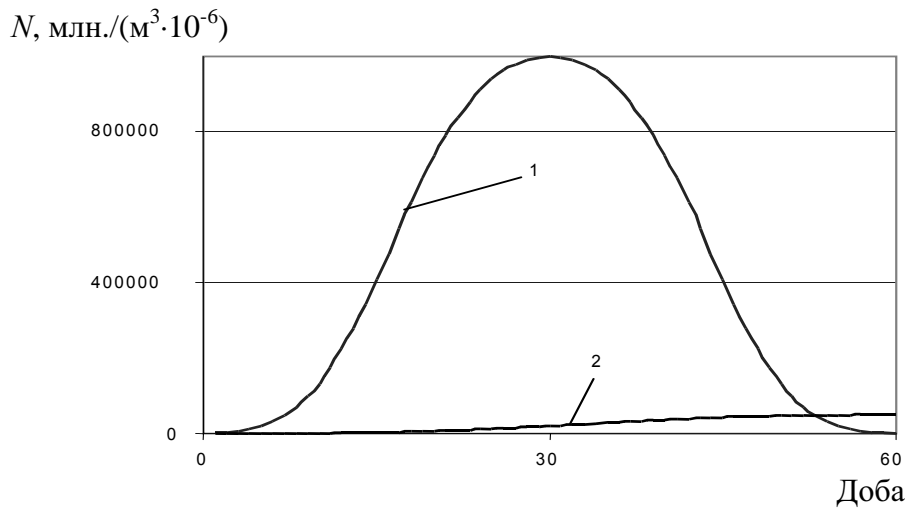


Рисунок 1 – Динаміка популяції мікроорганізмів в об’ємі рослинної сировини (деревина сосни): 1 – без біозахисту, 2 – біозахист антисептиком

Враховуючи тривалість процесу біохімічного обміну речовин для функції біозахисних речовин представлено у вигляді (рис. 2):

$$R = \frac{1}{2} \left\{ 1 - \text{th} \left[\frac{1}{2} \left(1 - \frac{t}{t_m} \right) \cdot \Delta \right] \right\} \quad (7)$$

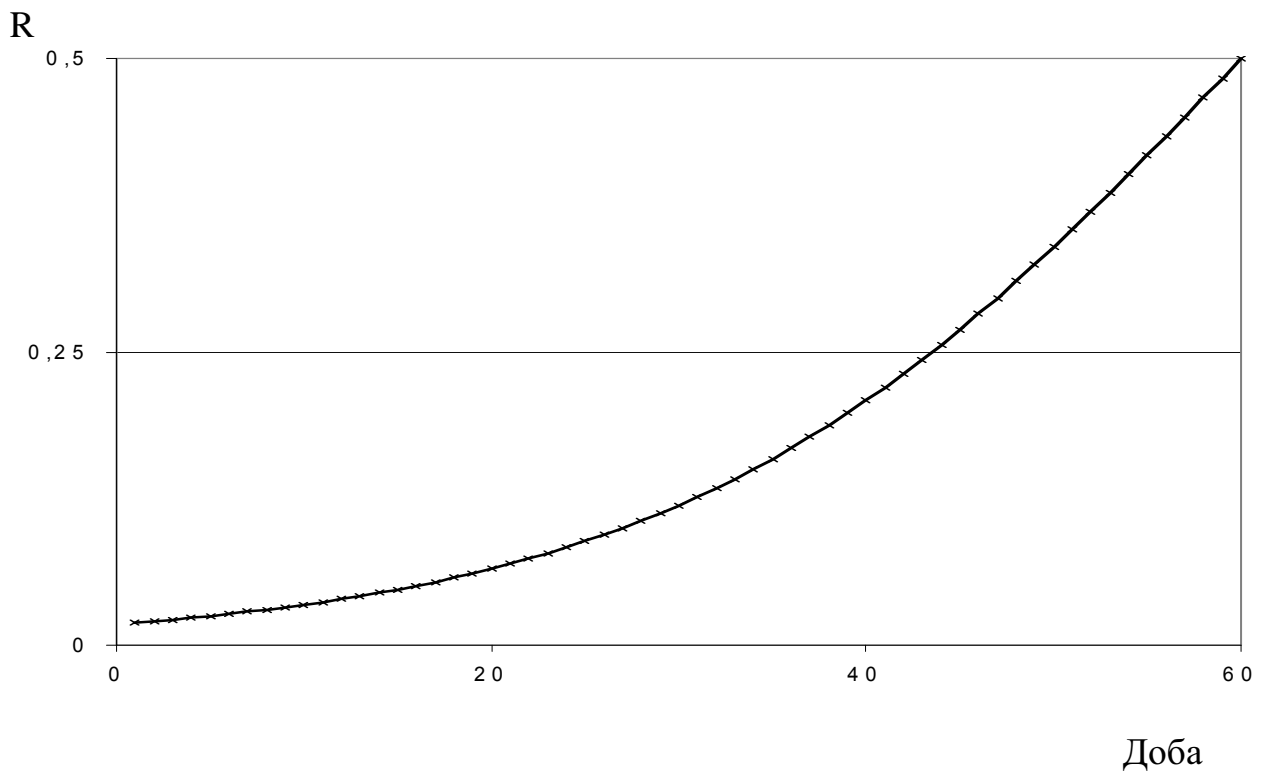


Рисунок 2 – Функція біозахисту антисептиком

Кількість органічної речовини X , що приймає участь у процесі розкладання розраховується за залежністю (рис. 3):

$$X = 1 - e^{-2kN_m \frac{t_m}{\Delta} \left\{ \operatorname{th} \frac{\Delta}{2} - \operatorname{th} \left[\left(1 - \frac{t}{t_m} \right) \cdot \frac{\Delta}{2} \right] \right\}} \quad (8)$$

На рис. 3 наведено розрахунок частки органічної речовини, яка руйнується під дією мікроорганізмів, та вплив біозахисних речовин на процес руйнування.

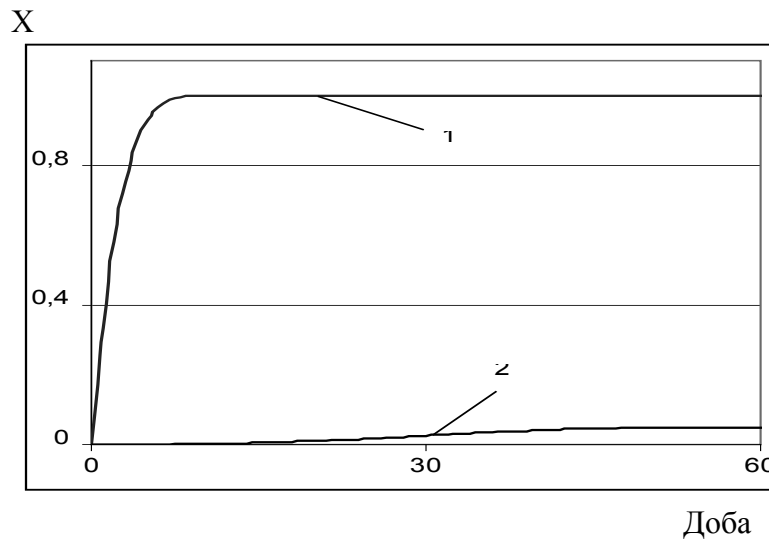


Рисунок 3 – Частка органічної речовини, яка руйнується під дією мікроорганізмів:
1 – без біозахисту, 2 – біозахист антисептиком.

Процес біологічного руйнування целюлозовмісного матеріалу характеризується інкубаційним періодом – тривалістю проміжку часу після якого починається інтенсивне руйнування матеріалу. В наших дослідженнях допускається, що тривалість цього періоду співпадає з проміжком часу t_m , за якого популяція мікроорганізмів досягне критичного розміру.

Визначено інтенсивність біоруйнування $I(t)$.

Підставимо у вираз для функції біоруйнування (1), отриману для розрахунку розмірів популяції формулу (6), а частку обсягу матеріалу, що приймають участь в обмінному процесі (8) приймаємо рівної 1 та функцію гіперболічного косинуса замінено на функцію гіперболічного тангенса відповідно до відомої тригонометричної формули [7], тоді:

$$I(t) = \frac{\psi_0}{V} \cdot N_m \cdot \left\{ 1 - \operatorname{th}^2 \left[\left(1 - \frac{t}{t_m} \right) \cdot \frac{\Delta}{2} \right] \right\} \quad (9)$$

Робимо припущення, що максимальна інтенсивність біоруйнування матеріалу починається з моменту t_m досягнення популяцією граничного розміру, у який на підставі виразу (9) маємо:

$$I(t_m) = \psi \quad (10)$$

де уведені позначення є об'ємна швидкість біоруйнування, $\text{кг}/(\text{доба} \cdot \text{м}^3)$:

$$\psi = \frac{\psi_0}{V} N_m \quad (11)$$

Вводимо безрозмірний час:

$$\tau = t \cdot \frac{v}{h}, \quad (12)$$

де v – швидкість біообростання, м/доба;
 h – глибина проникнення (біоруйнування), м.

Динаміка біоруйнування з урахуванням (9–12) має наступний вигляд:

$$\frac{dI}{d\tau} = \psi \cdot \left\{ 1 - \text{th}^2 \left[\left(1 - \frac{\tau}{\tau_m} \right) \cdot \frac{\Delta}{2} \right] \right\} \quad (13)$$

де τ_m - відносна величина інкубаційного періоду біоруйнування:

$$\tau_m = t_m \cdot v/h \quad (14)$$

Загальний інтеграл рівняння (13) по часу приводить до наступного вигляду:

$$I = \frac{\psi \cdot \tau_m}{x} \cdot \left\{ \text{th}x - \text{th} \left[\left(1 - \frac{\tau}{\tau_m} \right) \cdot x \right] \right\} \quad (15)$$

де x – константа інтегрування, яка отримана з урахуванням початкової умови:

$$I|_{\tau=0} = 0 \Rightarrow x = \Delta/2 \quad (16)$$

а з урахуванням (14):

$$I = \frac{\psi \cdot t_m \cdot v}{x \cdot h} \cdot \left\{ \text{th}x - \text{th} \left[\left(1 - \frac{t}{t_m} \right) \cdot x \right] \right\} \quad (17)$$

Проведено дослідження з визначення біостійкості деревини методом визначення біологічної стійкості до дії мікрофлори лісового ґрунту, враженого культурами грибів роду *Ceratocystus*, *Sporodemium*, *Penicillium* згідно з [8] в умовах лабораторії хімічної обробки та захисту деревини і клеїв УкрНДІ “Ресурс”. Зразки деревини сосни розміром 30x30x15 мм просочували біозахисним препаратом “Гембар”. Контрольні і оброблені препаратом “Гембар” зразки в умовах випробувань згідно з [8, 9] витримували протягом двох календарних місяців. Результати досліджень наведено в таблиці 1.

Таблиця 1 - Результати дослідження впливу препарату “Гембар” на стійкість деревини до біоруйнування

Об’єкт випробування	№ досліду	Кількість зразків	Середня маса зразків до випробування, г	Середня маса зразків після випробування, г
Необроблені (незахищені) зразки деревини сосни (контрольні в даній серії випробувань)	1	5	6,5	4,0
	2	5	6,8	4,3
	3	5	6,5	4,0
	4	5	6,6	4,1
	5	5	6,6	4,1
Зразки деревини сосни, які оброблені препаратом “Гембар”	6	15	6,7	6,67
	7	15	6,8	6,76
	8	15	6,8	6,77
	9	15	6,8	6,75
	10	15	6,7	6,67

Аналіз результатів показав, що біообростання необроблених зразків проходило зі швидкістю близько 0,00045 м/доба, максимальна втрата маси в разі біоруйнування склала 38 %, глибина проникнення бактерій становила по всій товщині (0,015 м), для зразків, оброблених препаратом “Гембар” біообростання проходило зі швидкістю близько $0,3 \cdot 10^{-7}$ м/доба, глибина проникнення до 1,2 мм, а втрата маси зразків деревини, які були оброблені, була менше 1,9 %, що значно менше ніж регламентовано нормами [7].

За даними таблиці 1 розраховано масову швидкість біоруйнування за рівнянням:

$$\psi = \frac{\Delta m}{\tau \cdot V}, \quad (18)$$

де Δm – втрата маси зразків після випробувань, г;
 τ – час випробування, доба;
 V – об’єм зразка, м³.

Для даної серії зразків масова швидкість біоруйнування становить 3,08 кг/(м³·доба) для необроблених і 0,25 кг/(м³·доба) для оброблених відповідно.

На рис. 4 представлено результати оброблення даних про тривалість періоду біоруйнування та її швидкості. Дані оброблялися за допомогою Microsoft Excel статистичною функцією:

$$t_m = a \cdot \psi^b, \quad (19)$$

де a і b – емпіричні константи доба і м³·доба/кг.

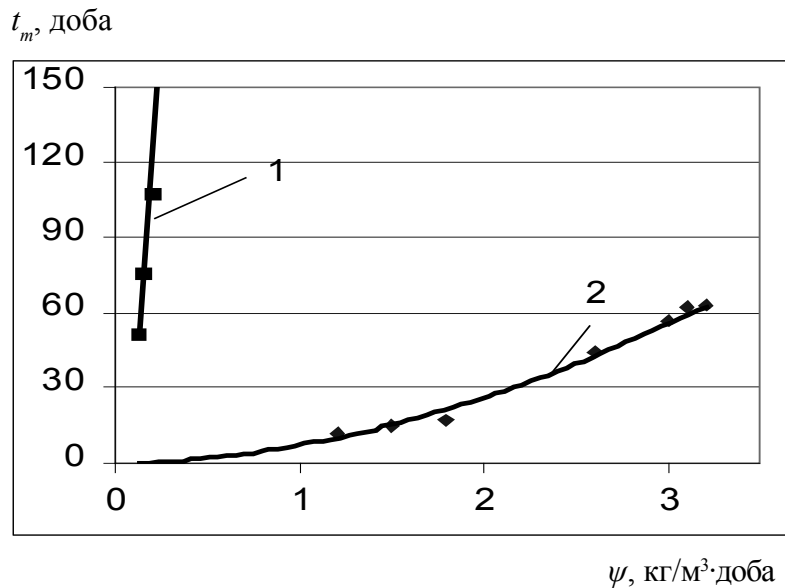


Рисунок 4 - Залежність швидкості біоруйнування деревини ψ від тривалості інкубаційного періоду: 1 - оброблена, 2 - необроблена

Так як у відповідності з умовою $t = t_m$ та $I=1$ на основі виразу (17) отримуємо для параметрів руйнування t_m і $x=\Delta/2$:

$$thx = \frac{\chi}{t} \cdot x \quad (20)$$

де χ - параметр, що характеризує проміжок часу за якого під дією біоруйнування з одиниці об'єму втрачається одиниця маси матеріалу.

Грунтуючись на рівнянні (20), переходимо до визначення другого параметра обмінного процесу x .

Завдання вирішуємо в наступному порядку. Спочатку обчислюється біоруйнівну характеристику матеріалу χ . Згідно з рис. 4 інтенсивне біоруйнування необробленої деревини починається на 15 добі і питома густина зразка зменшується до 300 kg/m^3 за масової швидкості біоруйнування $\psi = 3,08 \text{ kg/(m}^3 \cdot \text{доба)}$. Відповідно до цього, значення параметра χ ($\chi = \Delta\rho/\psi$) становить 48,7 доби.

Із графіка (рис. 4) апроксимація для необробленої деревини дає значення $a = 8,009$; $\epsilon = 1,795$, то за рівнянням (20) значення параметра t_m становить 60,32 діб відповідно.

Розрахуємо параметр A :

$$A = \frac{\chi}{t_m} \quad (21)$$

та вирішуємо графічно рівняння (18) і отримуємо значення $x = \Delta/2 = 1,3$ (рис. 5).

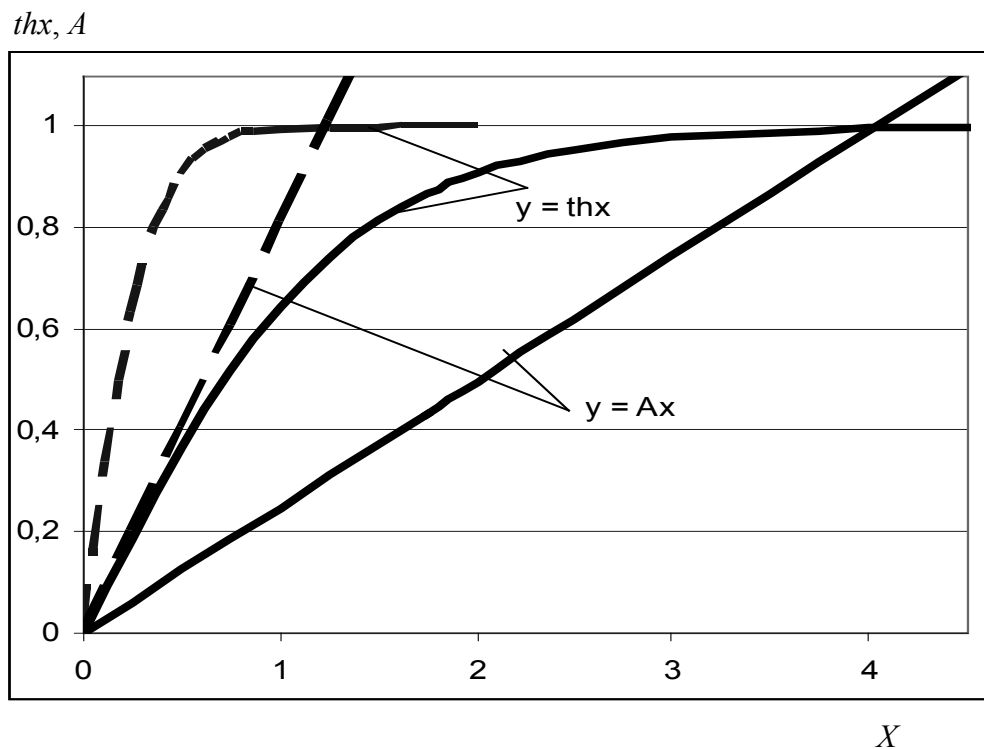


Рисунок 5 - Визначення параметрів біоруйнування

Для обробленої деревини інтенсивне біоруйнування необробленої деревини починається на 56 добі і питома густина зразка зменшується до 440 кг/м^3 , значення параметра χ ($\chi = \Delta\rho/\psi$) становить 40,0 дб, апроксимація для необробленої деревини $a = 1655,4$; $v = 1,6838$, t_m становить 161,2 дб. Значення $x = \Delta/2 = 4,0$.

Розрахована інтенсивність біоруйнування необробленої деревини, яка становить $0,94 \text{ кг}/(\text{м}^3 \cdot \text{доба})$, а для біозахищеної деревини відповідно складає $0,002 \text{ кг}/(\text{м}^3 \cdot \text{доба})$.

Таким чином, у результаті проведених досліджень складено математичну модель процесу біоруйнування целюлозовмісного матеріалу мікроорганізмами, визначена залежність і проведено моделювання динаміки біоруйнування матеріалу, яка враховує тривалість інкубаційного періоду та вплив біозахисних речовин. Встановлено, що біозахист зміщує швидкість та інтенсивність біоруйнування у значно більші часові терміни.

ЛІТЕРАТУРА

1. Шевченко С.В. Лесная фитопатология / С.В. Шевченко, А.В. Цилюрик – К.: Вища школа. - 1986. - 384 с.
2. ГОСТ 20022.9-76*. Древесина, консервирование. Капиллярная пропитка способом нанесения на поверхность. - Взамен ГОСТ 16416-70 - [Введен 01.01.78]. -М.: Изд-во стандартов, 1977. - 6 с.
3. Цапко Ю.В. Моделювання процесу біоруйнування целюлозовмісних матеріалів // Науковий вісник будівництва / Ю.В. Цапко // Харків: ХДТУБА, ХОТВ АБУ. - 2007. - Вип. 49. - С. 254-265.
4. Жданова Г.В. Математическая модель влияния динамики роста микроорганизмов на ресурс работы ионообменных фильтров / Г.В. Жданова, О.И. Куржеевская // Зб. наук. пр. Севастопольського військово-морського інституту ім. П.С.Нахімова. - Севастополь: СВМІ. - 2008. - Вип. 1(14). - С. 28-37.

5. Откидач Д.М. Математическая модель источников тепловыделения в насыпи растительного сырья / Д.М. Откидач, Ю.В. Цапко // Зб. наук. праць. - Львів: ЛДУ БЖД. - 2007. - Вип. 10. - С. 48-52.

6. Кольцов К.С. Самовозгорание твердых веществ и материалов и его профилактика / К.С.Кольцов, Б.Г. Попов – М.: Химия, 1978. – 160 с.

7. Бронштейн И.Н. Справочник по математике / И.Н. Бронштейн, К.А. Семендяев – М.: Гос. изд-во. физико-математической литературы, 1959. - 608 с.

8. Полотна нетканые (подоснова) антисептированные из волокон всех видов для теплозвукоизоляционного линолеума. Метод определения биостойкости: ГОСТ 26603-1985.– М.: Изд-во стандартов, 1985.

9. ГОСТ 16712-95 Межгосударственный стандарт. Средства защитные для древесины. Методы испытания токсичности. - Киев: Госстандарт Украины, 1997.- 8 с.