

*Я.І. Соколовський д.т.н., професор (Український державний лісотехнічний університет),
Є.І. Івашко (Львівський інститут пожежної безпеки МНС України)*

МЕТОДИКА ТА РЕЗУЛЬТАТИ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ МЕХАНІЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ ДЕРЕВИНИ

Наведено методику та результати експериментальних досліджень реологічних властивостей деревини із врахуванням анізотропії залежно від зміни температури і вологості.

Актуальність проблеми і задачі досліджень. Для дослідження механічних властивостей обробленої вогнезахисними засобами деревини у змінних температурно-вологісних полях важливою задачею є проведення експериментальних досліджень для визначення реологічних характеристик матеріалу із врахуванням анізотропії. Одночасно актуальним є накопичення, систематизація та узагальнення даних експериментальних реологічних властивостей деревини.

Не претендуючи в цьому випадку на аналіз сучасного стану даної проблематики [1,2,3,8,7,10], зазначимо що нами отримані деякі принципово важливі результати визначення реологічних характеристик деревини лише у рамках пружинно-демпферних моделей, які не можна вважати повними та узагальненими.

На основі експериментальних досліджень деревини, для визначення механічних властивостей матеріалу у змінних температурно-вологісних полях, поставлено задачі реологічних досліджень деревини, які полягають ось у чому:

- одержати криві реологічних характеристик деревини (повзучості і релаксації) вздовж і впоперек волокон у широкому діапазоні зміни температури і вологості;
- встановити параметри повзучості і релаксації, необхідні для розрахунку в'язкопружних деформацій деревини;
- обґрунтувати застосування прискорених методів досліджень, які б дозволили прогнозувати реологічні властивості деревини на довготривалий час (що перевищує тривалість експерименту).

Виконання сформульованих задач обумовило необхідність вдосконалення існуючого обладнання та розробки нових пристроїв і методів обробки експериментальних даних для описання параметрів реологічної поведінки деревини у змінних температурно-вологісних умовах, а також вирішення багатьох специфічних задач, а саме вибір форми і розмірів досліджуваних взірців; схеми механічного і фізичного навантаження; способів вимірювання деформацій у відповідних зонах взірця. Для вказаних задач із метою зменшення тривалості попередніх експериментів, які враховують почерговий вплив окремих факторів, відповідні методики експериментальних досліджень супроводжуються теоретичними обґрунтуваннями, які дозволяють використовувати та узагальнювати наявну інформацію у технічній літературі і підвищити ефективність експериментальних досліджень.

Обладнання для досліджень та вибір умов експерименту. Експериментальні дослідження реологічних властивостей деревини у напрямі осей анізотропії проведено на випробувальній машині ZST-3 дооснащеній термовологісною камерою із регулювальною системою температурно-вологісного режиму, системою кріплення взірця, системою автоматичного регулювання навантаження взірця (рис.1).

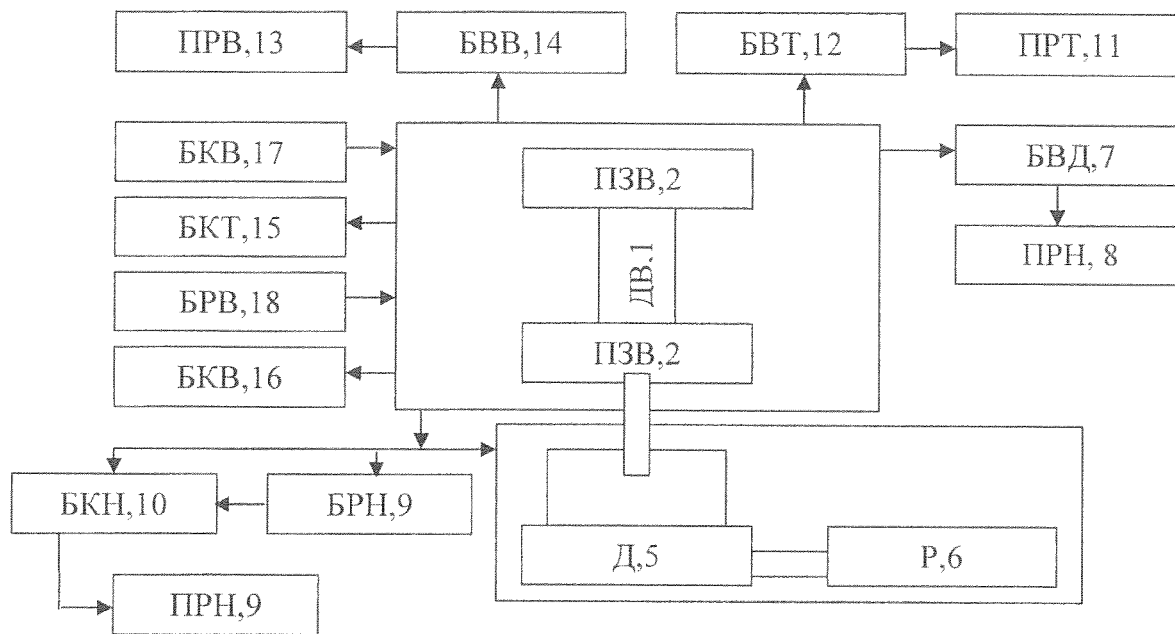


Рис.1. Структурна схема установки для реологічних випробовувань деревини залежно від температурно-вологісного поля (ДВ,1 – дерев'яний взірець; ПЗВ,2 – пристрої затискання взірця; СН,3 – система навантаження; ВП,5 – гвинтова передача; Д,5 – двигун; Р,6 – редуктор; БВД,7 – блок вимірювання деформацій; ПРН,8 – пристрої ресстрації навантаження; БРН,9 – блок регулятора навантаження; БКН,10 – блок контролю навантаження; ПРТ,11 – пристрій ресстрації температури; БВТ,12 – блок вимірювання температури; ПРВ,13 – пристрій ресстрації вологості; БВВ,14 – блок вимірювання вологості; БКТ,15 – блок контролю температури; БКТ,16 – блок контролю вологості; БКВ,17 – блок ресстрації температури; БРТ,18 – блок ресстрації вологості.

Запропонований спосіб кріплення дерев'яного взірця у затискових пристроях дозволяє звести до мінімуму вплив зусилля від затискачів на напружено-деформований стан взірця. Аналіз динамічних навантажень у взірці проводився на основі осцилограм, отриманих шляхом запису сигналів від тензорезисторів, наклеєних на пружинний тензометр типу 2ПКП-10-1000. Для запису сигналів використовувалися магнітоелектричні гальванометри типу МО14-1200 із робочою смугою частот 0-750 Гц. Результати вимірювання власних коливань, а також теоретична оцінка впливу динамічних навантажень на процес повзучості дерев'яних взірців у початковий момент навантаження показали, що через наявність демфірування коливання практично затухають через 2,5с., а для $\tau \geq 5с$ величина відхилення експериментальних значень від розрахункових становить до 2%.

Отже, при часі $T = 5с$ практично відсутній вплив динамічних ефектів експериментальної установки на параметри повзучості і релаксації деревини.

Для дослідження реологічної поведінки деревини у змінних температурно-вологісних полях використано термовологісну камеру типу FutroN 3001, яка дозволяє фіксувати значення температури у діапазоні від 0°C до 100°C і відносної вологості повітря – 10-100%. Для зменшення теплопровідності і досягнення більш рівномірного нагрівання бокові стінки обклеювалися алюмінієвою фольгою на паперовій основі.

Зміна і регулювання температури здійснювалися за допомогою стабілізаційної системи, яка складається із нагріваючих елементів – електроламп напругою 220 В і струмом 0,12 А, температурного реле, лабораторних автотрансформаторів. Регулювання температури у термокамері здійснювалося у діапазоні від 0 °С до 100 °С з кроком 5 °С.

Коливання температури не перевищувало 0,5 °С. Температуру у термокамері вимірювали термоелектричним пірометром. Робочий кінець (гарячий спай) термопари розташовується у термокамері, а вільний (холодний спай) – у скляній посудині з подвійними стінками (посудина Дьюара), заповненій льодом нульової температури. Лід отримали з дистильованої води.

Процес зволоження повітря у термовологокамері регулювався приладом типу СПР-104 у діапазоні від 5% до 60% з кроком 2,5%. Для забезпечення стабільної вологості деревини, протягом часу вимірювання кривих повзучості для заданих значень температури і статичного навантаження, повітря у термовологокамері зволожувалося до відповідного значення відносної вологості ϕ , яке визначали з діаграми рівноважної вологості деревини [6].

Для вимірювання деформацій повзучості, контролю довжини взірця використовувався оптичний деформометр, встановлений на спеціальному штативі перед вікном камери. Вимірювання деформації проводилися дистанційно. Загальне лінійне збільшення оптичної системи рівне 25х. Перевірка точності показів приладу здійснювалась за стрілковим індикатором годинникового типу із ціною поділки 0,001мм. Реєстрація показів здійснювалась фотографуванням.

Вимоги до досліджувальних взірців. Геометричну форму і розміри взірців для проведення досліджень вибирали з врахуванням способу навантаження (стиск, розтяг), розмірів робочої ділянки і впливу крайових ефектів. Для встановлення розмірів робочої ділянки дерев'яного взірця виходили із таких умов:

- а) на робочій ділянці напружений стан повинен бути однорідним;
- б) на робочій ділянці взірця необхідно забезпечити надійне розміщення і кріплення вимірювальних давачів;
- в) довжина вимірювальної бази не повинна перевищувати 5/6 довжини робочої частини взірця.

За критерій однорідності напруження поля взірця прийнято величину β [7]

$$\beta = (\sigma^{\max} - \sigma^{\min}) / \sigma_0 \cdot 100\% \quad (1)$$

де σ^{\max} , σ^{\min} , σ_0 – відповідно максимальне, мінімальне і середнє значення напружень.

Для приведення теоретичних досліджень впливу форми деревинних взірців та анізотропії структурних властивостей на характер розподілу реологічних характеристик використано рішення задачі визначення напружень у призмі при розтягу (стиску) [5]. Окрім того, для обґрунтування розмірів поперечного перерізу робочої частини взірців враховувалася наявність необхідної кількості “анатомічних” елементів, характерних для даної породи деревини. Зокрема, за даними [3,10] досліджуваний взірець має містити не менше 5 - 6 річних шарів. Оскільки їх товщина для різних порід деревини коливається у досить широких межах (для сосни і ялини вона дорівнює 1мм., а для дуба і берези - 2мм), то мінімальний розмір поперечного перерізу взірця у першому випадку не повинен бути меншим за 5мм., а у другому - за 10мм. Для забезпечення однорідності напружень в дерев'яних взірцях кривизна їх річних шарів не повинна перевищувати 1÷2% [10]. Ступінь кривизни визначається відношенням довжини стріли до довжини її хорди d

$$\delta = d^{-1} \left(r - \sqrt{r^2 - (d/2)^2} \right) \quad (2)$$

де r - радіус кривизни річного шару.

Оскільки $(\delta d)^2 \ll (d/2)^2$, то згідно з (2), розміри дерев'яних взірців для проведення реологічних досліджень мають задовольняти ще умові $d \approx 8\delta r$. Величина d визначає розмір поперечного перерізу взірців для випробовування вздовж волокон та довжину робочої зони зразків, досліджуваних впоперек волокон.

Реологічні властивості деревинних матеріалів досліджувалися для значень температур 20°C, 40°C, 80°C, 95°C і вологості від 8% до границі гігроскопічності. Для досягнення відповідних ступенів вологості взірці витримувалися в ексикаторах. Оскільки аналіз експериментальних досліджень свідчить про відсутність впливу вологості, значення якої є більшими від границі гігроскопічності на напружено-деформівний стан деревини, і враховуючи те, що для досягнення границі гігроскопічності необхідні довготривалі витримування взірців у певних умовах [6], взірці для вологості W_r свідомо отримували значення вологості, які є більшими за границю гігроскопічності.

Рівні навантаження вибирались із умов збереження лінійного зв'язку між деформаціями і напруженнями і не перевищення кривої довготривалого опору.

Методика досліджень реологічних властивостей деревини вздовж волокон. Суттєва складність реологічної поведінки деревини спричинена взаємодією змінних температурно-вологісних полів, вказує на необхідність розробки єдиного підходу для описання реологічних властивостей деревини вздовж волокон у широких діапазонах зміни температурно-вологісних факторів на основі використання деяких масштабних функцій, що обумовлюють інваріантність деформівних процесів відносно зміни вищенаведених факторів, тобто, якщо в'язкопружна поведінка деревини для базових значень напружень σ_{i0} , температури T_0 і вологості W_0 характеризується релаксаційним спектром [4], то процес релаксації для $W = W_1$ між τ_0 і $\tau_0 + d\tau_0$ може бути замінений процесом із часом релаксації між $\tau = \tau_0 / a_w$ і $\tau + d\tau = (\tau + d\tau) / a_w$, де a_w – коефіцієнт волого-часової редуції.

Для реологічної моделі деревини використовується рівняння лінійної в'язкопружності, яке включає безперервний розподіл релаксаційного спектру

$$R(\tau, T_0, W) = R_0(W) + \sum_{i=1}^n R_i(T_0, W_0) \left(1 - \exp\left(-\frac{\tau a_w}{\tau_i}\right) \right) \quad (3)$$

де W_0 – базова вологість матеріалу; R_i, R_0 – відповідно тривалий і миттєвий модулі пружності.

Формула (3) записана для $T = T_0$ і сталої, але відмінної від базових значень вологості матеріалу.

З метою побудови узагальнених кривих повзучості деревини вздовж волокон на основі експериментальних даних деформацій значення (3) визначаються із співвідношення:

$$R(\tau, T, W) = \bar{\varepsilon}(\tau) / \sigma \quad (4)$$

де σ – задане значення, $\bar{\varepsilon}(\tau)$ – усереднене значення деформації повзучості.

Отримані результати відображають у напівлогарифмічній системі координат $R(\tau, T, W)$ - $\ln \tau$ із визначенням довірчих інтервалів для $R(\tau, T, W)$.

Визначається базовий період, який характеризується часовим інтервалом експериментального визначення повзучості. Мінімальний час базисного періоду співпадає із першим відрахунком значення повзучості дерев'яного взірця після закінчення його навантаження, а максимальний час відповідає часові закінчення дослідів.

Для визначення масштабної функції a_w вибирається базова крива для $W = W_0$ (у середині експериментального вологісного інтервалу або ближче до його нижньої осі) і вимірюється відстань $\Delta_j \ln a_w$ між сусідніми кривими повзучості, експериментально отриманими і переведеними у напівлогарифмічну систему координат.

Вимірювання проводимо у декількох точках, розміщених посередині базового періоду. Результати вимірювань горизонтального зсуву $\Delta_j - \ln a_w$ між парою сусідніх кривих осереднюємо. Значення послідовно просумовуємо, починаючи із встановленого значення вологи W_0 . Знак сумування визначається знаком різниці $W - W_0$. Експериментальні значення зсувів представляються у логарифмічних системах координат $(\ln a_w, \Delta W)$, а масштаб вибирають так, щоб кут нахилу кривої до осі абсцис був рівним приблизно $\pi/4$. Емпіричну залежність $\ln a_w = f(T, W)$ вибирають, виходячи з умов найкращої апроксимації дослідних даних за найменшої кількості вільних констант, які визначаються методом найменших квадратів.

Отримані результати кривих повзучості берези відповідно для розтягу і стиску для різних значень температури і вологи. У початковий момент часу ($\tau=0$) деформування виникає миттєва пружна (Гуківська) деформація, її величина зростає із швидкістю зміни температурно-вологісного навантаження. Миттєва деформація обумовлена внутрішніми силами взаємодії. Після миттєві деформації розвивається в'язка (еластична) деформація, яка є вислідом дисипації кінетичної енергії макроскопічного руху у деревинному матеріалі. З підвищенням вологовмісту процеси дисипації енергії у деревині прискорюються, тобто час, що характеризує перехід дерев'яного взірця з одного термодинамічного рівноважного стану в інший зменшується.

Аналіз кривих повзучості вищезгаданих деревних порід у початковий момент часу $\tau = 0$ підтверджує отримані результати досліджень для миттєвого модуля з пружності $E_{\text{мит}}$, [1,7]. Модулі миттєвої пружності ($E_{\text{мит}} = \sigma / \varepsilon(t)$), для $\tau = 0$ вздовж волокон деревини сосни, ялини і берези не залежно від способу навантаження з ростом вологи W в інтервалі від 0 до 30% зменшуються за лінійним законом. Для $W > W_{\text{IT}}$ миттєві модулі пружності практично не змінюються.

Для досліджуваних порід збільшення вмісту вологи обумовлює зростання деформацій ε . Особливо сильна залежність деформації від вологи W спостерігається у діапазоні від 10% до 30%, а із подальшим підвищенням зміна величини ε незначною. Таку залежність ε від вологи деревини можна пояснити таким чином. Згідно з [6,12], у деревині розрізняють вільну і зв'язану вологу. Оскільки у міру зволоження деревини від 10 до 30% молекули води проникають в об'єм молекул лігніну і целюлози, то у результаті змінюється величина міжмолекулярних взаємодій і збільшується гнучкість і рухливість молекул лігніну і целюлози, тобто ріст деформації є безпосередньо пов'язаний з адсорбцією молекул води і набуханням деревини. Подальше збільшення W змінює лише кількість вільної вологи, а зв'язана (гігроскопічна волога) залишається незмінною і приблизно становить 30%. Зміна кількості вільної вологи не змінює розміри дерев'яного взірця, тобто конформація молекул лігніну і целюлози є сталою, а незначне підвищення вязкопружної деформації з ростом W і спад часу релаксації кривих повзучості вздовж волокон пов'язані з процесами внутрішнього тертя або в'язкості (зменшується коефіцієнт в'язкості деревини). У результаті дії вологи величина повної деформації ε деревинних матеріалів зростає, її зміна залежить не лише від кількості, але і від форм зв'язку вологи з матеріалом.

Для встановлення залежностей деформацій повзучості деревини від температури t і вологи W скористаємося залежністю (3). Можливість застосування (3) слідує із експериментальних кривих повзучості для деревини у напівлогарифмічній шкалі координат. Аналіз свідчить про інваріантність в'язкопружних властивостей деревини відносно зміни вологості. Зміна вологи деревинного взірця на величину $\Delta W = W - W_0$ веде до зміщення кривої повзучості $\varepsilon(\ln t, \Delta W)$ у напівлогарифмічній шкалі координат вздовж осі $\ln t$ на деяку величину $\ln a_w(\Delta W)$, яка є масштабною функцією або коефіцієнтом вологісно-часового зсуву.

Таким чином, зміна температурно-вологісного поля обумовлює паралельне зміщення кривих повзучості деревини вздовж осі $\ln t$, а це виражає сутність температурно-вологісної аналогії [4] для дослідження реологічних властивостей деревини вздовж волокон. Тобто, згідно з (3) вплив t і W на повзучість деревини вздовж волокон зводиться до зміни лише швидкості реологічного процесу, а всі члени спектра часів релаксації змінюються пропорційно t і W .

Виходячи з вище наведеного аналізу, криві повзучості деревини для різних значень σ, t і W можуть бути апроксимовані співвідношенням із ядром повзучості у вигляді суми експонент

$$\varepsilon = \sigma \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n b_i \left[1 - \exp\left(-\frac{\tau}{\tau_{oi}/a(t, W)}\right) \right] \quad (4)$$

де τ_{oi} – дискретний спектр часів релаксації для базових значень t_0 і W_0 ; b_i – деякі коефіцієнти, $a(t, W)$ – функція релаксаційного зсуву.

Встановлена апроксимаційна залежність $a(t, W)$ для температури $t = 40^\circ\text{C}$ і порід деревини сосни, ялини, берези і дуба у такому вигляді

$$a(t, W) = \left(\frac{W_0}{W}\right)^b \frac{\ln 50 \left(1 - \left(\frac{E_T(W_0)}{E_M(W_0)}\right)\right)}{\ln 50 \left(1 - \left(\frac{E_T(W)}{E_M(W)}\right)\right)} \quad (5)$$

де b – коефіцієнт, який залежить від породи деревини і виду навантаження. Його значення наведено у таблиці 1.

Таблиця 1. Значення коефіцієнта b для різних порід деревини

Порода		Сосна	Ялина	Береза
b	стиск	0.63	0.51	0.42
	розтяг	4.73	4.3	3.85

Параметри повзучості, які входять у (4), наведено для деревини берези. Для цього криві повзучості для всіх значень зміни t і W будувались у напівлогарифмічній системі координат $(\varepsilon, \ln t)$. Базові значення температури та вологості відповідно дорівнювали $t_0 = 40^\circ\text{C}$, $W_0 = 10\%$. За зсувами між сусідніми кривими для відповідних значень t і W знаходили величину $\ln a(t, W)$. На основі попереднього аналізу встановлено, що функція $\ln a(t, W)$ є нелінійною за кожним із аргументів, а також обумовлюється їх взаємовпливом. Тому рівняння регресії для $a(t, W)$ прийнято у вигляді

$$\ln(\bar{t}, \bar{W}) = \alpha_1 \bar{t} + \alpha_2 \bar{t}^2 + \alpha_3 \bar{W} + \alpha_4 \bar{W}^2 + \alpha_5 \bar{t} \bar{W}, \quad (6)$$

де $t = t - t_0$, $W = W - W_0$.

Коефіцієнти α_i ($i = 1, 5$) визначені методом найменших квадратів:

$\alpha_1 = 0,167715$; $\alpha_2 = 0,00375$; $\alpha_3 = 2,97143$; $\alpha_4 = -0,73584$; $\alpha_5 = 0,01796$.

Точність апроксимації оцінювалась за співвідношенням

$$r = \sqrt{\frac{1}{n} \sum \left(\frac{\ln a^e - \ln a^p}{\ln a^e} \right)^2} \cdot 100\%.$$

Задовільне співпадання розрахункових та експериментальних даних ($r = 7,13\%$) свідчить про можливість застосування регресійної залежності (4) у досліджуваних діапазонах зміни t і W . Розрахунки показують, що складова, яка у (6) описує взаємовплив t і W , дає найменший відносний вклад у величину $\ln a(t, W)$. Значимість α_5 визначалась згідно з методикою [4]. У нашому випадку встановлено, що кореляційна поправка α_5 обумовлює значиме значення дисперсії на рівні достовірності 83%. Отже, для досліджуваних діапазонів зміни t і W їх взаємовплив проявляється.

Розрахункові значення часів релаксації τ_{oi} і коефіцієнтів b_i наведено у таблиці 2. Число дискретних часів релаксаційного спектра, вибране залежно від точності апроксимації, дорівнює 8.

Таблиця 2. Значення коефіцієнтів b_i і спектрів релаксації τ_{oi} . ($i = 1 \div 8$) для берези

i	1	2	3	4	5	6	7	8
$\tau_{oi} \cdot 10^3$	0.027	0.981	3.017	6.954	16.375	56.831	139.653	324.059
$b_i \cdot 10^3$	0.237	0.237	0.237	0.237	0.638	0.638	0.638	0.638

Висновки. Таким чином, на основі аналізу експериментальних даних реологічної поведінки деревини вздовж волокон для одновісного розтягу (стиску) у лінійній області зв'язку між напруженнями і деформаціями і різних фіксованих значеннях температури і вологості встановлено зберігання температурно-волого-часової аналогії. Реологічна поведінка деревини описується співвідношенням (4). Функція зсуву релаксаційного спектру – формула (6).

ЛІТЕРАТУРА

1. Ашкенази Е.К. *Анизотропия древесины и древесных материалов*, Л., 1980 -247с.
2. Белянкин Ф.П., Яценко В.Ф. *Деформативность и сопротивляемость древесины, как упруго - вязкопластического тела*, К., 1957.- 200с.
3. Божок О.П., Віттонів І.С. *Деревинознавство з основами лісового товарознавства*, К., ММК ВО, 1992. - 320с.
4. Кравчук А.С., Майборода В. П., Уржусцев Ю. С. *Механика полимерных и композитивных материалов*, М., 1985.-319с.
5. Лехницький С.Г. *Теория упругости анизотропного тела*, М. Наука, 1977. – 416 с.
6. Серговский П.С. *Гидротермическая обработка и консервирование древесины*. М. 1978.- 400 с.
6. Соколев О.С. *Древесина как конструктивный материал* М. *Лесная промышленность* 1979. - 248с.
7. Соколовський Я.І. Експериментальні дослідження в'язкопружних властивостей деревини // *Науковий вісник Укр.ДЛТУ*, Випуск 7. 1997. -91-99с.
8. Soklovsky Y., Pobereyko B., Filinuk R. *Vyshum reologichych vlastivosti dreva a drevnych compozitov* // XIII Symposium «Pokroku vo vyrobe a pouzitiv lepidiel drevopriemysle», Tehnicka universita vo Zvolene, Slovakia, 3-5, 09,1997,-p. 85 - 94.
9. Уголев Б.Н. *Древесиноведение с основами товароведениями*, М., 1986. - 362с.
10. Уголев Б.Н., Лапшин Ю.Г., Пинтус Л.В., Кузнецова Т.В. *Влияние изменения влажности и структуры на деформации нагруженной древесины* // *Древообр. Пром.*, 1973, №2, с.12-14
11. Чудинов Е.С. *Проблемы теории взаимодействия древесины с водой* // *Мат. Симпозиума координационного совета современным проблемам древесиноведения*, М., 1990. - с. 22 - 25.