

ДЕФОРМУВАННЯ ДЕРЕВИНИ ЗА РОБОТИ НА ОСЬОВИЙ СТИСК, ПРЯМИЙ ТА КОСИЙ ПОПЕРЕЧНИЙ ЗГИН

DEFORMATION OF WOOD DURING AXIAL COMPRESSION, DIRECT AND OBLIQUE TRANSVERSE BENDING

Гомон С. С., д.т.н., проф., ORCID.ORG /0000-0003-2080-5650, Гомон Св. Св., д.т.н., проф., ORCID.ORG /0000-0001-9818-1804 (Національний університет водного господарства та природокористування, м. Рівне),

Gomon S.S., doctor of technical sciences, professor, Homon S.S., doctor of technical sciences, professor (National University of Water and Environmental Engineering, Rivne)

В лабораторії НУВГП проведено комплексні експериментально-теоретичні дослідження роботи елементів з цільної та клеєної деревини за осьового стиску, прямого та косоного поперечного згину. На основі експериментальних досліджень встановлено січний модуль деформацій деревини при осьовому стиску та поперечному згині. Побудовано діаграми деформування різних шарів деревини балок з цільної та клеєної деревини в зоні чистого згину по висоті поперечного перерізу за роботи на прямий та косий згин за дії одноразових та повторних навантажень. Експериментально визначено положення нейтральної лінії в зоні прямого чистого згину. Встановлено, що починаючи з початку прикладання одноразового короткочасного статичного навантаження нейтральна площина в балках з цільної та клеєної деревини змінює своє положення в сторону зменшення висоти розтягнутої зони.

In the laboratory of the National University of Water Management and Nature Management, complex experimental and theoretical studies of the operation of elements made of solid and glued wood under axial compression, direct and oblique transverse bending were carried out. The obtained results of experimental studies made it possible to establish the shear modulus of wood deformations under axial compression and transverse bending. The shear modulus of deformations with increasing loads decreases due to the growth of elastic and plastic deformations of wood, and at any two experimental points, a graph of dependence can be reliably plotted and the initial modulus of elasticity of wood can be established.

The layer-by-layer relative deformations of the wood in the beams were established, which were determined in the zone of pure bending at different distances from the neutral plane at different levels of load. Also, the processing

of the research results made it possible to construct diagrams of the deformation of different layers of wood of beams made of solid and glued wood in the zone of pure bending along the height of the transverse cross-section for work on direct and oblique bending under the action of one-time and repeated loads. This made it possible to experimentally establish the position of the neutral line in the zone of direct net bending. It was established that starting from the beginning of the application of a one-time short-term static load, the neutral plane in beams made of solid and glued wood changes its position in the direction of decreasing the height of the stretched zone.

Also, an increase in the load in beams made of solid and glued wood due to an increase in the number of cycles for low-cycle repeated loading leads to the displacement of the neutral line in the section of the zone of pure bending towards the stretched zone, as a result of which the area of the compressed zone increases. The data of the study provide an opportunity to improve the new method of calculating bending elements from wood according to the deformation model.

Ключові слова:

Деревина, осьовий стиск, згин, деформації деревини, модуль деформацій.

Wood, axial compression, bending, deformations of wood, modulus of deformations.

Вступ. Отримання надійних експериментальних даних по діаграмах деформування суцільної і клеєної деревини за повздовжнього розтягу та стиску при дії одноразових чи повторних навантажень [1, 2, 3], наявність аналітичного апарату обчислення коефіцієнтів поліному, які дають можливість описати процес деформування, встановлення чотирьох стадій напружено-деформованого стану роботи елемента під навантаженням, можливість визначення початкового модуля пружності та врахування обґрунтувань основних передумов та гіпотез [4, 5, 6] дозволяють розраховувати пошарове напруження по висоті розрахункового поперечного перерізу елемента з деревини, що працює на поперечний згин. Для розробки розрахункового апарату необхідно встановлювати напружено-деформований стан згинальних елементів прямокутного поперечного перерізу на всіх стадіях напружено-деформованого стану елемента з деревини [7]. При цьому використання повних діаграм механічного стану, як цільної, так і клеєної деревини, за повздовжнього стиску дають можливість встановлювати пошарове розподілення деформацій в розтягнутій та стиснутій зонах.

Огляд стану питання. Перші підходи по теорії розрахунку конструкцій з деревини в основному базувалися на методі розрахунку за допустимими напруженнями. Розподіл напружень по висоті поперечного перерізу прийнято згідно «класичної» залежності напруження-деформації за законом Гука. Основним недоліком цієї теорії є те, що вона не враховує пластичні

властивості деревини, а також те, що зразки в умовах розтягу і стиску показують різні властивості нелінійного деформування.

В запропонованій Лолейтом А.Ф. теорії розрахунку за руйнівними зусиллями питання про форму епюр напружень стиснутої та розтягнутих зон не розглядалося.

Нині діюча теорія граничної рівноваги виявилась головним стержнем, навколо якого стала створюватись сучасна теорія розрахунку будівельних конструкцій. На основі теорії граничної рівноваги розроблені методи розрахунків конструкцій за граничними станами, які прийнято в чинних нормах ДБН В.2.6-161:2017 [8]. Відповідно до цього граничний стан щодо руйнування характеризується сприйняттям повного зовнішнього зусилля за повного використання, як стиснутої, так і розтягнутої зон нормального розрахункового поперечного перерізу.

Базовою рахується робота стиснутої та розтягнутої зони деревини, як пружна, а зв'язок між деформаціями і напруженнями прийняті лінійними, незважаючи на те, що зростання повздовжніх деформацій деревини стиску за початкових завантажень не є лінійним через еластичну складову. Це спрощене представлення дійсного зв'язку між напруженнями та деформаціями стиснутої та розтягнутої зон призводить до суттєвих похибок і спотворення напружено-деформованого стану елемента на практично всіх стадіях роботи [7, 9]. А сам розрахунок дерев'яних елементів суцільного поперечного перерізу, які працюють на стиск, розтяг, згин, проводиться за досить спрощеною методикою, яка базується на теоретичних твердженнях запропонованих в 40-60 роках ХХ століття, виходячи з кусково-лінійної залежності між напруженнями та деформаціями ($\sigma - u$). Кусково-лінійні залежності ґрунтуються на діаграмах деформування деревини на стиск і розтяг встановлених за м'якого режиму деформування на зразках з чистої деревини.

Викладення основного матеріалу. Експериментальними дослідженнями встановлено, що при деформуванні деревини за осьового стиску в деформаціях можна легко виділити, як пружну, так і пластичну складові [1], тобто

$$u_{c,d} = u_{c,el,d} + u_{c,pl,d} \quad (1)$$

Виконані експериментальні досліди на призмах з цільної та клеєної деревини показали, що за нелінійної залежності ($\sigma - u$) залежність «січний модуль деформацій – напруження» ($E' - \sigma$) при стиску вздовж волокон деревини, завантаженої з постійною швидкістю приросту навантаження, або деформацій на висхідній гілці діаграми, є лінійною [6] і описуються рівнянням

$$E' = \frac{\sigma}{u} = E_o \pm \frac{E_o - E_{f_{c,0,d}}}{f_{c,0,d}} \cdot \sigma = E_o (1 \pm \lambda_{f_{c,0,d}} \eta), \quad (2)$$

де $\lambda_{f_{c,0,d}} = \frac{u_{pl,d}}{u_{1,d}}$ – коефіцієнт пластичності деревини вздовж волокон за

$\sigma = f_{c,0,d}$, що визначаються шляхом обробки дослідних даних методами математичної статистичної обробки.

Результати статистичної обробки дослідних даних підтвердила лінійність залежностей $E' - \eta$ і хорошу ступінь відповідності кореляційних та дослідних значень деформацій: абсолютна величина коефіцієнта кореляції r близька до одиниці, її достовірність r/m_r завжди більше чотирьох, найбільше значення варіаційного коефіцієнта відношень $\frac{u^{докл}}{u^{кор}}$ склало $V = 4,75\%$.

Дослідження, за рекомендаціями ДБН В.2.6-161:2017, ДСТУ EN 408:2007, були проведені на зразках конструкційних розмірів. Січний модуль деформацій E' для цільної та клеєної деревини, які працюють на стиск вздовж волокон (зразки ПЦ-1, ПЦ-2, ПЦ-3, ПЦ-4, ПЦ-5, ПК-2, ПК-3, ПК-4, ПК-5, ПК-1), зі збільшенням рівня напружень η , постійно зменшується (рис. 1).

Модуль пружності деревини в згинальних елементах (БЦ-1, БЦ-2, БЦ-3, БДК-1, БДК-2, БДК-3, БДК-4, БДК-5) визначали як середній, між модулем пружності для стиснутої і розтягнутої зон в балках з цільної та клеєної деревини за прямого згину різного рівня навантажень:

$$E = \frac{E_x^+ + E_x^-}{2} \quad (3)$$

$$E_x^+ = \frac{M_i}{W} \cdot \left(\frac{u_i + u_c}{2u_i^2} \right), \quad (4)$$

$$E_x^- = \frac{M_i}{W} \cdot \left(\frac{u_i + u_c}{2u_c^2} \right), \quad (5)$$

Модуль пружності клеєної деревини для елементів, що зазнають косоного згину визначали за методикою вимірювань різниці прогинів на ділянці чистого згину на різних етапах завантаження з умови, що вимірювання проводяться з дотриманням $M = \text{const}$ за рекомендаціями Thunel B. [10]

$$E_x = \frac{Fl_p^3}{548I_x(f_c - f_F)} \quad (6)$$

Проведені нами експериментально-аналітичні дослідження показали, що модуль пружності встановлений такими способами за різних рівнів навантаження згинального елемента не є початковим модулем пружності, а є січним модулем деформацій.

Експериментально встановлено, що лінійна залежність ($E' - \eta$) шляхом екстраполяції дає можливість, за допомогою математичної статистики, встановити значення початкового модуля пружності E_0 (аналітично або графічно). Це значення визначається як граничне значення січного модуля пружно-пластичності E' при $\sigma = 0$ ($\eta = 0$).

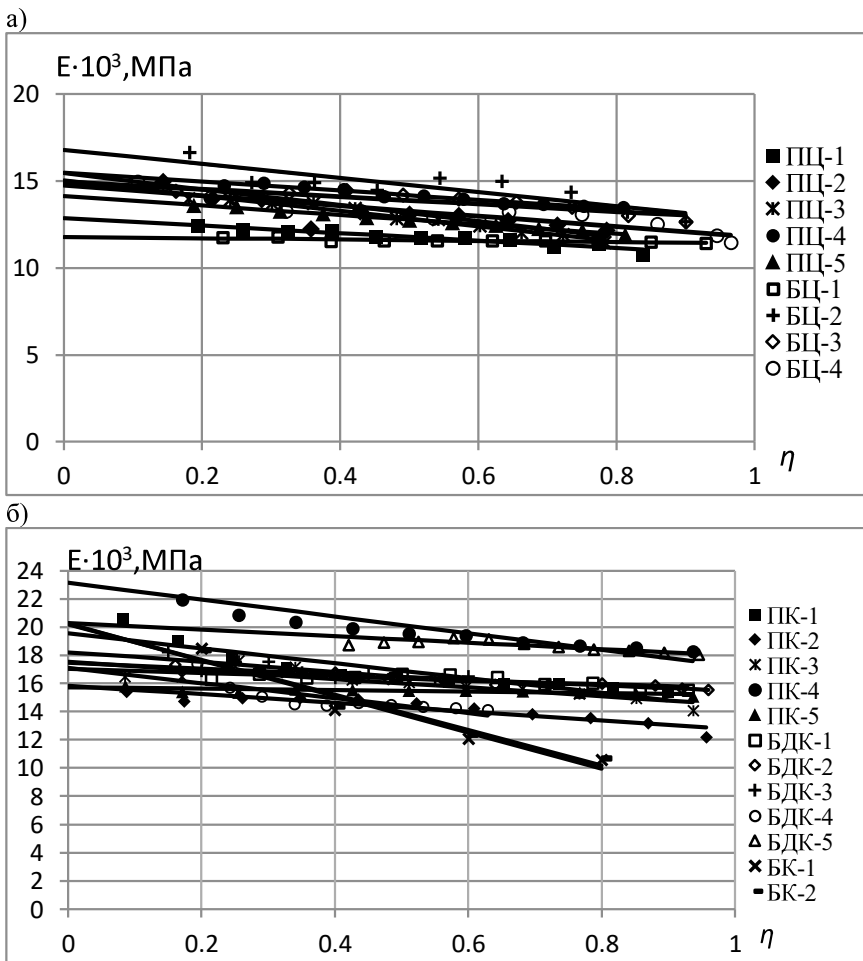


Рис. 1. Діаграми зміни січного модуля деформацій вздовж волокон деревини за дії короткочасного навантаження: а) цільної; б) клесної

Діаграми пошарово визначених відносних деформацій в зоні прямого чистого згину балок з цільної та клесної деревини (рис. 2, рис. 3), які виникали за зростання короткочасного навантаження показано на рис. 4.

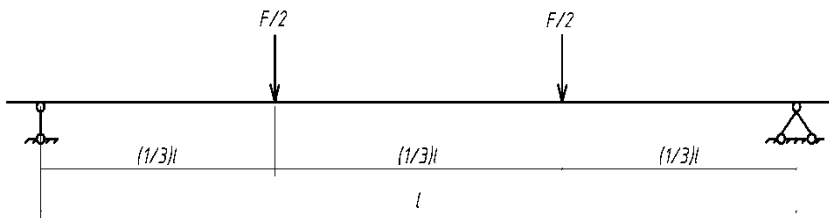


Рис. 2. Розрахункова схема балок з деревини

Відносні деформації деревини в балках вимірювалися в зоні чистого згину на різних відстанях від нейтральної площини за допомогою тензодатчиків з базою 50 мм, які були наклеєні по всьому периметру перерізу з кроком 1,0 см.

Деформування різних шарів стиснутої та розтягнутої зон балки з цільної деревини за косоного згину з кутом підрізу балки в 10° приведено на рис. 5, а, а графіки деформування деревини поперечного перерізу балок з в'язями на рис. 5, б. Як видно з рисунку 5, різні шари деревини поперечного перерізу балок за різних умов роботи деформуються по-різному.



Рис. 3. Загальний вигляд дослідної установки при випробуваннях балок на поперечний згин

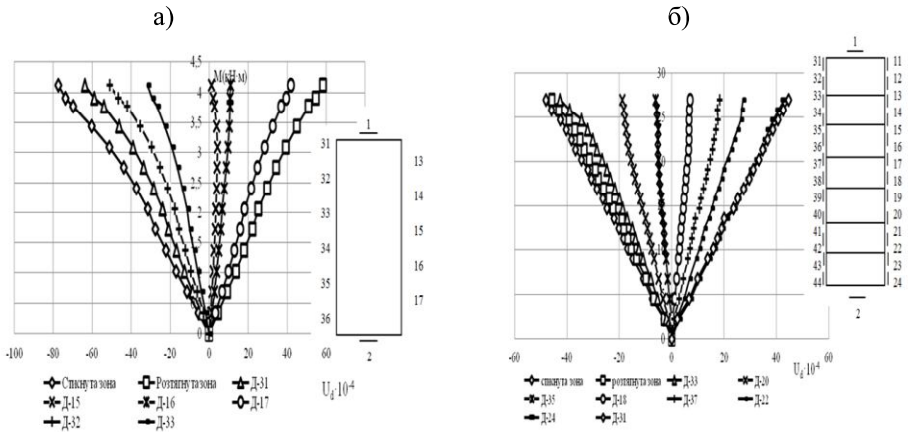


Рис. 4. Діаграма деформування різних шарів деревини балок в зоні прямого чистого згину: а) з цільної деревини; б) з клеєної деревини

На діаграмах відносні деформації стиснутої зони показані зі знаком мінус, розтягнутої зони — зі знаком плюс.

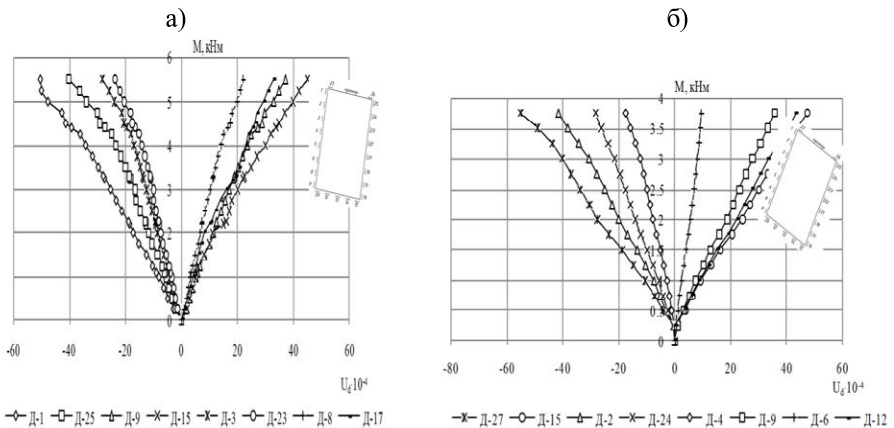


Рис. 5. Діаграми деформування різних шарів деревини в зоні чистого згину балки з деревини за косою згину: а) з кутом 10° ; б) з кутом 25°

Повторним малоцикловим статичним навантаженням було випробовано 12 балок з клеєної деревини за різних режимів роботи з розрахунковим числом циклів від 50 до 500.

Приріст відносних деформацій деревини в найбільш віддалених шарах стиснутої зони на верхньому рівні завантаження в зоні чистого згину балок за

прямого [11] чи косоного згину [12] і режиму повторних навантажень (0,2-0,4) $M_{руйін}$ відбувався до 21 циклу і склав 3,4% (рис. 6). На наступних циклах приріст відносних деформацій деревини затух, а на 30 циклі практично дорівнював нулю. Відносні деформації деревини в найбільш віддалених шарах стиснутої зони на верхньому рівні завантаження в зоні чистого косоного згину балок за прямого чи косоного згину і режиму повторних навантажень (0,2-0,6) $M_{руйін}$ і вище поступово і неупинно зростали. Це приводило до руйнування балок на одному із циклів завантаження.

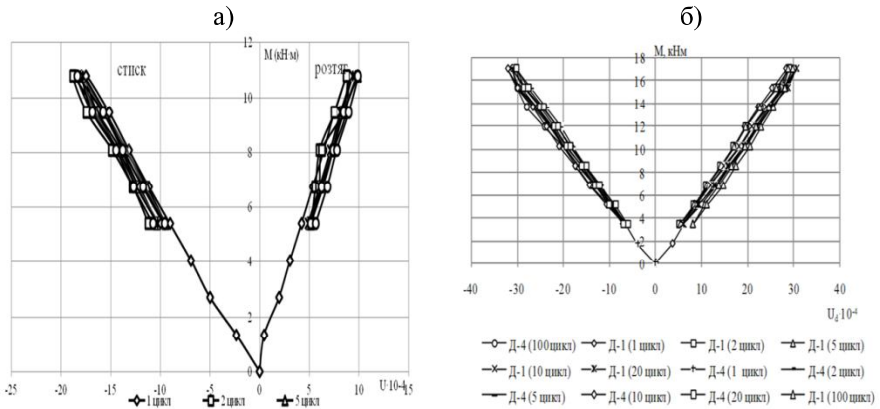


Рис. 6. Діаграми деформування найбільш віддалених шарів деревини в зоні чистого прямого згину балок з клеєної деревини за режиму повторних навантажень: а) (0,2-0,4) $M_{руйін}$; б) (0,2-0,6) $M_{руйін}$

Встановлено відносні деформації деревини в балках, які були визначені в зоні чистого згину на різних відстанях від нейтральної площини дали можливість експериментально визначити положення нейтральної лінії в зоні прямого чистого згину [13] і це показало, що починаючи з початку прикладання одноразового короткочасного статичного завантаження нейтральна площина в балках з цільної та клеєної деревини (рис. 7,а) змінює своє положення в сторону зменшення висоти розтягнутої зони [14].

За роботи балок в режимі повторних навантажень [15] в елементах усіх марок зменшення площі розтягнутої зони починалося на першому ж циклі завантаження з подальшими змінами на всіх циклах завантаження (рис. 7,б).

Як видно з рисунку 7 в реальній умовах зі збільшенням навантаження нейтральна лінія рухається в сторону збільшення площі стиснутої зони і відповідно зменшення розтягнутої зони яка в чинних нормах [8] вважається незмінною .

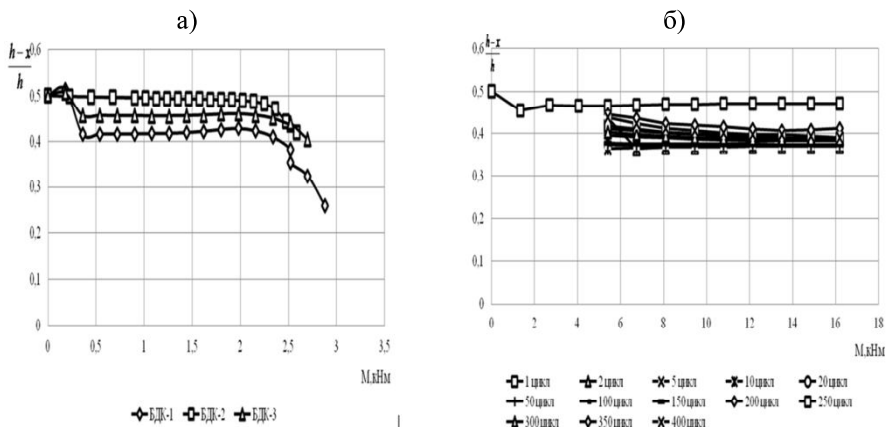


Рис. 7. Графік експериментальних значень зміни нейтральної лінії балки з деревини за роботи: а) на чистий згин ; б) за дії повторного навантаження

Результати експериментальних даних пошарових відносних деформацій по висоті поперечного розрахункового перерізу елемента з цільної та клеєної деревини за прямого поперечного згину дають можливість будувати епюри напружень на всіх етапах роботи згинального елемента з деревини. Це дає можливість розробки достовірних розрахунків згинальних елементів з деревини за деформаційною методикою в заміну неточної силової методики, яку використано в чинних нормах [8].

Висновки.

1. На основі виконаних експериментально-статистичних досліджень встановлено, що січний модуль деформацій E' із зростанням навантажень зменшується внаслідок зростання еластичних та пластичних деформацій деревини, а за будь-якими двома експериментальними точками можна достовірно побудувати графік залежності ($E' - \eta$) та встановити початковий модуль пружності деревини $E_{0,c,d}$.

2. Встановлено пошарові відносні деформації деревини в балках, які були визначені в зоні чистого згину на різних відстанях від нейтральної площини за різних рівнів навантаження.

3. Збільшення навантаження в балках з цільної та клеєної деревини за одноразового навантаження та збільшення кількості циклів за малоциклового повторного навантаження призводить до переміщення нейтральної лінії в перерізі зони чистого згину в сторону розтягнутої зони, в результаті якого збільшується площа стиснутої зони.

4. Отримані результати експериментальних досліджень дають можливість розробки методики розрахунку згинальних елементів з деревини за деформаційною методикою.

1. Гомон Св.Св., Ясній П.В., Гомон П.С., Ясній В.П. Класична модель дійсної роботи суцільної та модифікованої деревини осьовим стиском вздовж волокон: монографія. Рівне: Волинські обереги, 2023. 316с.

Homon S.S., Yasniy P.V., Homon P.S., Yasniy V.P. Klasychna model' diysnoyi roboty sutsil'noyi ta modyfikovanoi derevyny os'ovym styskom vzdovzh volokon: monohrafiya. Rivne: Volyns'ki oberehy, 2023.–316s.

2. Гомон С.С, Гомон С.С., Сасовский Т.А. Діаграми механічного стану деревини сосни за одноразового короточасного деформування до повної втрати міцності матеріалу. Ресурсоekonomні матеріали, конструкції, будівлі та споруди. Рівне, 2011. Вип. 22. С. 166-171.

Gomon S.S, Homon S.S., Sasovskyy T.A. Diahramy mekhanichnoho stanu derevyny sosny za odnorazovoho kortokchasnoho deformuvannya do povnoyi vtraty mitsnosti materialu. Resursoekonomni materialy, konstruktsiyi, budivli ta sporudy. Rivne, 2011. Vyp. 22. S. 166-171.

3. Гомон С.С, Гомон С.С., Сасовский Т.А. [Діаграми механічного стану деревини сосни за повторного деформування до повної втрати міцності матеріалу.](#) Ресурсоekonomні матеріали, конструкції, будівлі та споруди. Рівне, 2012. Вип. 24. С. 106-112.

Gomon S.S, Homon S.S., Sasovskyy T.A. Diahramy mekhanichnoho stanu derevyny sosny za povtornoho deformuvannya do povnoyi vtraty mitsnosti materialu. Resursoekonomni materialy, konstruktsiyi, budivli ta sporudy. Rivne, 2012. Vyp. 24. S. 106-112.

4. Гомон С.С. Напружено-деформований стан і розрахунок за деформаційною методикою елементів з деревини при одноразових та повторних навантаженнях: монографія. Рівне: Волинські обереги, 2019. 288с.

Gomon S.S. Napruzheno–deformovanyu stan i rozrakhunok za deformatsiynoyu metodykoju elementiv z derevyny pry odnorazovykh ta povtornykh navantazhennyakh: monohrafiya. Rivne: Volyns'kioberehy, 2019. 288s.

5. Гомон С.С., Полищук М.В. [Експериментально-статистичні дослідження залежностей січний модуль - рівень напружень для цільної та клеєної деревини.](#) Ресурсоekonomні матеріали, конструкції, будівлі та споруди. Рівне, 2018. Вип. 36. С. 60-67.

Gomon S.S., Polishchuk M.V. Eksperymental'no-statystychni doslidzhennya zalezhnostey sichnyy modul' - riven' napruzhen' dlya tsil'noyi ta kleyenoyi derevyny. Resursoekonomni materialy, konstruktsiyi, budivli ta sporudy. Rivne, 2018. Vyp. 36. S. 60-67.

6. Гомон С. С., Полищук Н. В. Способ определения упруго-пластических характеристик цельной и клееной древесины на образцах конструкционных размеров при сжатии. Science and Education a New Dimension. Natural and Technical Sciences, Budapest, 2018. VI (21). Iss. 179. Pp. 17–20.

Gomon S. S., Polishchuk N. V. Sposob opredeleniya uprugoplasticheskikh kharakteristik tsel'noy i kleyenoy drevesiny na obraztsakh konstruktсионnykh razmerov pri szhatii. Science

and Education a New Dimension. Natural and Technical Sciences, Budapest. 2018. VI (21). Iss. 179. Pp. 17–20.

7. Гомон С.С. Стадії напружено-деформованого стану нормальних перерізів роботи деревини на згин. Ресурсоекономічні матеріали, конструкції, будівлі та споруди. Рівне, 2011. Вип. 21. С. 176-180.

8. ДБН В.2.6-161:2017. Конструкції будинків і споруд. Дерев'яні конструкції. Основні положення. К.: Мінрегіон України, 2017. 111 с.

DBN V.2.6-161:2017. Konstruktsiyyi budy'nkiv i sporud. Derev'yani konstruktsiyyi. Osnovni polozhennya. K.: Minregion Ukrainy, 2017. 111 s.

9. S. Gomon, S. Gomon, V. Karavan, P. Gomon, J. Sobczak-Piąstka. Calculated cross-sectional model and stages of the stress-strain state of the wood element for transverse bending. AIP Conference Proceedings, 2019, 2077.

10. Thunel B. On the Premises for Mechanical grading of Timber. Paperi ja puu. teos 51. №4. P. 373-377.

11. Гомон С.С., Сасовський Т.А. Робота згинальних елементів із клеєної деревини за дії малоциклових навантажень. Ресурсоекономічні матеріали, конструкції, будівлі та споруди. Рівне, 2014. Вип. 29. С. 123 -128.

Gomon S.S., Sasovskyy T.A. Robota z hynal'nykh elementiv iz kleynoyi derevyny za diyi malotsyklovykh navantazhen'. Resursoekonomni materialy, konstruktsiyyi, budivli ta sporudy. Rivne, 2014. Vyr. 29. S. 123 -128.

12. Гомон С.С., Павлюк А.П. Робота дощатоклеєних дерев'яних балок в умовах косоного згину при дії одноразових та повторних навантаженнях. Ресурсоекономічні матеріали, конструкції, будівлі та споруди. Вип. 34. Рівне, 2017. С.118-128.

Gomon S.S., Pavlyuk A.P. Robota doshchatokleynykh derev'yanykh balok v umovakh kosoho z-hynu pry diyi odnorazovykh ta povtornykh navantazhennyakh. Resursoekonomni materialy, konstruktsiyyi, budivli ta sporudy. Vyr. 34. Rivne, 2017. S.118-128.

13. Гомон С.С., Пугач Ю.В. Положення нейтральної лінії та її вплив на встановлення дійсних механічних характеристик деревини за поперечного згину. Ресурсоекономічні матеріали, конструкції, будівлі та споруди. Рівне, 2022. Вип. 42. С. 107-115.

Homon S.S., Puhach YU.V. Polozhennya neytral'noyi liniyi ta yiyi vplyv na vstanovlennya diysnykh mekhanichnykh kharakterystyk derevyny za poperechnoho zhyunu. Resursoekonomni materialy, konstruktsiyyi, budivli ta sporudy. Rivne, 2022. Vyr. 42. S. 107-115.

14. Livas C., Ekevad M., Öhman M. (2022). Experimental analysis of passively and actively reinforced glued-laminated timber with focus on ductility. *Wood Material Science & Engineering*, Volume 17, Issue 2.

15. Gomon S.S., Pavluk A.P. Study on working peculiarities of glue laminated beams under conditions of slanting bending. *Підводні технології. Промислова та цивільна інженерія*. Київ, 2017. №7. С. 42-48.

Gomon S.S., Pavluk A.P. Study on working peculiarities of glue laminated beams under conditions of slanting bending. *Pidvodni tekhnolohiyyi. Promyslova ta tsyvil'na inzheneriyayo* K., 2017. №7. S. 42-48.

16. [J. Sobczak-Piąstka](#), [A. Pavluk](#), [S. S. Gomon](#), [P. Gomon](#), [S. Homon](#), [I. Lynnyk](#). (2023). Changing the position of the neutral line of beams made of glued wood in conditions of oblique bending. *AIP Conf. Proc.* 2928, 080007.