

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ БІОРЕСУРСІВ  
І ПРИРОДОКОРИСТУВАННЯ УКРАЇНИ**

**БАРАНОВА ОЛЬГА СЕРГІЇВНА**

УДК 674-419.3

**ДЕФЕКТОСКОПІЯ ФАНЕРИ УДАРНО-АКУСТИЧНИМ МЕТОДОМ**

05.23.06 «Технологія деревообробки,  
виготовлення меблів та виробів з деревини»

Автореферат дисертації на здобуття наукового ступеня  
кандидата технічних наук

Київ – 2017

Дисертацією є рукопис

Роботу виконано в Національному університеті біоресурсів і природокористування України Міністерства освіти і науки України

**Науковий керівник** кандидат технічних наук, доцент  
**Головач Валентин Михайлович**,  
Національний університет біоресурсів  
і природокористування України,  
доцент кафедри технології деревообробки

**Офіційні опоненти:** доктор технічних наук, професор  
**Бехта Павло Антонович**,  
Державний вищий навчальний заклад  
Національний лісотехнічний університет України,  
завідувач кафедри технологій деревинних  
композиційних матеріалів, целюлози та паперу

кандидат технічних наук, доцент  
**Єрошенко Андрій Михайлович**,  
Чернігівський національний  
технологічний університет,  
доцент кафедри технологій  
машинобудування та деревообробки

Захист відбудеться «7» червня 2017 року о 13<sup>00</sup> годині на засіданні спеціалізованої вченої ради К 26.004.11 у Національному університеті біоресурсів і природокористування України за адресою: 03041, м. Київ, вул. Героїв Оборони, 15, навчальний корпус № 3, кімната 301

З дисертацією можна ознайомитися у бібліотеці Національного університету біоресурсів і природокористування України за адресою: 03041, м. Київ, вул. Героїв Оборони, 13, навчальний корпус № 4, кімната 41а

Автореферат розісланий «4» травня 2017 року

Вчений секретар  
спеціалізованої вченої ради

Н. В. Буйських

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

**Актуальність теми.** При виробництві фанери 80 % дефектів виникають через розшарування, наявність яких у готовій продукції неприпустима. Причини утворення внутрішніх дефектів зумовлені порушенням технологічного процесу і нестабільністю якості вхідної сировини. Внутрішні дефекти зазвичай виявляються тільки при розкроюванні, що приводить до вимушеного відбракування виробів, сировинних та енергетичних втрат. Визначити розшарування під час виготовлення фанери складно, оскільки це вимагає зупинки процесу, що в подальшому спричиняє руйнування виробу. Існуючі неруйнівні методи контролю як-то радіаційний, радіоізотопний, потребують складного й дорогого обладнання. Проте за їх допомогою неможливо встановити наявність пустот у фанері, до того ж вони шкідливо впливають на здоров'я працюючих. Використання ультразвукового методу вимагає введення додаткової операції зі змочування поверхні фанери, що негативно відбивається на її якості. Це спонукає до впровадження альтернативного неруйнівного методу контролю якості фанери, застосування якого дасть можливість своєчасно визначити брак, сам він легко впишеться у технологічний процес, що дозволить його автоматизувати.

Автоматизація процесу контролю якості фанери виключає традиційний ручний контроль ударним методом наприкінці процесу виробництва і має суб'єктивний характер. Інформація, отримана під час виготовлення фанери, дає можливість контролювати і коригувати процес склеювання та встановити несправності у роботі обладнання. Своєчасне виявлення браку склеювання та вилучення дефектних листів з процесу шліфування дозволить заощадити час та електроенергію на виконання вказаних операцій.

Таким чином, вдосконалення нешкідливого та простого у застосуванні неруйнівного ударного методу контролю якості фанери під час її виготовлення, який дозволяє автоматизувати процес дефектоскопії, є актуальним науково-практичним завданням, що підвищить ефективність використання деревної сировини.

**Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.** Дисертаційна робота є складовою частиною науково-дослідної роботи, яка виконується відповідно до основних напрямів наукової діяльності кафедри технології деревообробки Національного університету біоресурсів і природокористування України, за тематикою «Застосування моніторингу контролю технологічних процесів виготовлення виробів з деревини та їх якості» (номер державної реєстрації 0116U001995, 2016–2020 рр.).

**Мета та завдання дослідження.** Мета дослідження – вдосконалення ударно-акустичного методу контролю якості фанери шляхом виявлення фізико-механічних параметрів, які впливають на якість, для реалізації в технологічному процесі виробництва.

Поставлена мета досягалася вирішенням таких завдань:

- проаналізувати методи контролю якості фанери;
- дослідити характер зміни амплітуди коливань фанери під час ударного впливу при відсутності та наявності в ній дефекту;

- обґрунтувати залежність акустичного сигналу ударного датчика від механічних коливань досліджуваного матеріалу;
- вдосконалити ударний метод контролю якості фанери для підвищення його точності та розробити структуру пристрою для його реалізації;
- створити експериментальну установку і визначити раціональні параметри оцінки сигналу ударного датчика;
- розробити принципову схему конструкції установки для неруйнівного контролю якості фанери в умовах виробництва;
- провести апробацію розробленого методу неруйнівного контролю якості фанери на виробництві.

*Об'єкт дослідження* – процес визначення дефектів фанери.

*Предмет дослідження* – встановлення взаємозв'язку якісних характеристик фанери (розшарування) з її акустичними характеристиками при ударно-акустичному методі контролю.

**Методи дослідження.** Теоретичні та експериментальні дослідження здійснювалися із застосуванням системного підходу на основі теорії коливань багатошарової пластини, спектрального аналізу гармонійних коливань, використання комп'ютерної техніки та програмного забезпечення.

У дисертаційній роботі використано такі методи досліджень: спектрального аналізу гармонійних коливань – для визначення параметрів фізико-механічних характеристик коливальних процесів у фанері при імпульсному збудженні останньої; математичного моделювання – для встановлення особливостей коливальних процесів у листі фанери та розробленні її реологічної моделі; ультразвукової дефектоскопії проходження ультразвуку через багатошарові матеріали – для визначення корельованості результатів дослідження між ультразвуковим та ударним методами контролю; статистичного аналізу – для опрацювання результатів експериментальних досліджень та перевірки адекватності моделей.

**Наукова новизна одержаних результатів.** Уперше запропоновано реологічну модель фанери з дефектом – як неоднорідну коливальну систему різних середовищ, що дало змогу змоделювати процес зміни коливальних процесів у фанері при зміні стану її структури.

Уперше запропоновано використовувати трипараметрову обробку сигналу ударного датчика (кількість імпульсів  $n$ , частота вільних коливань  $f$ , коефіцієнт гармонійних спотворень  $K_s$ ) контролю якості фанери, що значно підвищує ймовірність виявлення дефекту.

Уперше запропоновано критерій оцінки якості фанери, як відношення величини відсотка амплітуд гармонійних коливань до власної частоти коливання фанери.

**Практичне значення одержаних результатів** дисертаційної роботи полягає у наступному:

- вдосконалено ударно-акустичний метод та розроблено устаткування для його реалізації, що дозволять автоматизувати процес контролю якості фанери;

– розроблено пристрій контролю якості (патент України на корисну модель № 109890), багатоканальну автоматизовану установку для контролю якості по всій площині фанери (патент України на корисну модель № 113662), автоматизовану установку контролю якості фанери (патент України на корисну модель № 114684);

– проведено апробацію і впроваджено метод неруйнівного контролю якості фанери на ПАТ «Фанери та плити», ТОВ «АВВ дизайн» для контролю фанери призначеної, для будівництва, ТОВ «СУРА ЛТД» для контролю фанери, призначеної для пакування виробів;

– отримані результати дисертаційної роботи використовуються в навчальному процесі під час викладання дисциплін: «Теорія і технологія склеювання», «Актуальні проблеми механічної обробки деревини» та «Технологія клеєних матеріалів».

**Особистий внесок здобувача** полягає у вдосконаленні методу контролю якості, розробленні методики досліджень якості, узагальненні даних, аналізі стану проблеми, обґрунтуванні та розробленні наукової концепції і теми дисертації, формуванні мети та завдань виконаної роботи.

У працях, опублікованих у співавторстві, особистий внесок здобувача є таким: [2, 3, 4, 6, 9, 10] – проведено та опрацьовано результати експериментальних досліджень; [5] – запропоновано метод контролю якості фанери з автоматизованим селективним сортуванням; [7] – проведено математичний аналіз впливу удару на властивості фанери; [8, 17] – запропоновано метод підвищення якості фанери; [11] – проведено експериментальні дослідження і математичні розрахунки; [12, 13, 14] – запропоновано формулу винаходу на корисну модель; [18] – проведено аналіз результатів експериментальних досліджень.

**Апробація результатів дисертації.** Основні положення дисертаційної роботи було викладено у доповідях та обговорено на конференціях: «Вимірювання, контроль та діагностика в технічних системах» (м. Вінниця, 2015 р.); «Фізичні процеси та поля технічних і біологічних об'єктів» (м. Кременчук, 2015 р.); «Актуальні проблеми лісового сектору та садово-паркового господарства» (м. Київ, 2016 р.); «Комплексне забезпечення якості технологічних процесів та систем» (м. Чернігів, 2016 р.).

**Публікації.** Основні результати дисертаційного дослідження повною мірою представлено у 18 наукових працях, з яких 6 статей у наукових фахових виданнях України, стаття у науковому фаховому виданні України, включеному до міжнародних наукометричних баз даних, 2 статті у науковому виданні іншої держави, 2 статті в інших виданнях, 3 патенти України на корисну модель, 4 тези наукових доповідей.

**Структура та обсяг дисертації.** Дисертаційна робота складається зі вступу, п'яти розділів, висновків, додатків. Загальний обсяг дисертації становить 152 сторінок. Роботу проілюстровано 43 рисунками та 28 таблицями. Список використаної літератури включає 166 найменувань.

## ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** обґрунтовано доцільність та актуальність теми дисертаційної роботи, визначено мету і завдання досліджень, показано наукову новизну й

практичну значимість отриманих результатів, наведено дані про апробацію дисертації та відзначено особистий внесок здобувача.

У першому розділі «**Стан питання і завдання досліджень**» проведено аналіз літературних джерел та визначено напрям досліджень.

Традиційно для композитних матеріалів, клеєних деревинних матеріалів та масивної деревини використовують неруйнівні методи контролю, які враховують особливості властивостей об'єкта. Найпопулярнішими методами для дефектоскопії деревини та клеєних деревних матеріалів є акустичні. Це відображено для деревини в роботах: Б. К. Лакатоша (1956), Е. К. Ашкеназі (1978), Е. Хамма (1987), Ф. Лема (1987), М. Паттона-Меллорі (1987), Р. Де Грута (1994), Р. Росса (1998), Дж. Долвіна (2000), П. Німца (1998), Б. Брешоу (2000), К. Ліна (2007); і для клеєних деревних матеріалів у наукових працях: А. А. Піжуріна (1970), А. Н. Поліщука (1970), Ф. Белла (1991), Дж. Бернацького (1991), Б. Ільмана (2002), Дж. Діль-Ленгера (2005), І. Бобаділли (2009), С. Санабрії (2009), В. Букур (2011). Проте, нині для підвищення якості дефектоскопії вищезазначених деревних матеріалів не існує ефективного і недорогого методу, який би дозволив автоматизувати цей процес.

Фанера – це складний за структурою анізотропний матеріал, неметал, тому виключаються такі методи неруйнівного контролю, як магнітний і метод вихрових струмів. При виборі методу також потрібно враховувати, що фанера є великогабаритним виробом і може мати дефекти значних розмірів. Необхідно також звертати увагу на стан поверхні. Серед акустичних методів найточнішим є ультразвук. Суттєвий недолік згаданого методу полягає в необхідності «змочування» шорсткої поверхні фанери в'язкою рідиною в контактному варіанті вимірювань, тоді як в безконтактному – значно знижується чутливість такого методу. Ударний метод порівняно з іншими методами неруйнівного контролю простіший у реалізації, тому його можна вважати ефективним при дефектоскопії фанери.

У другому розділі «**Теоретичний аналіз ударного методу контролю фанери**» виконано теоретичні дослідження параметрів впливу ударного методу на властивості фанери.

За наявності у фанері такого дефекту як розшарування, структуру локальної ділянки, де знаходиться дефект, можна представити у вигляді двох пластин з повітряним прошарком всередині (рис. 1).

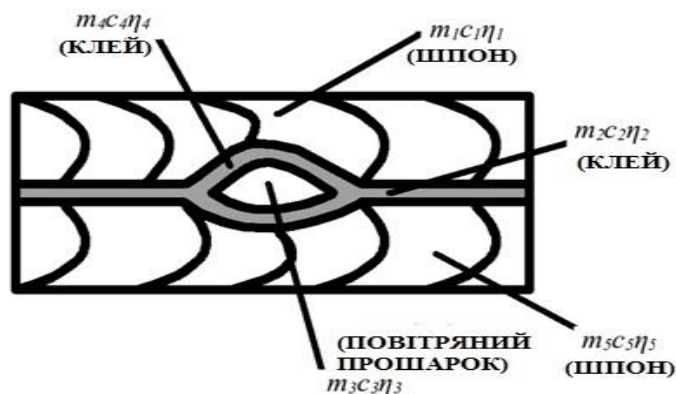


Рис. 1. Ділянка фанери з дефектом

Шпон, повітряний прошарок і шари клею – можна уявити як певні елементи, у яких наявна певна маса, пружність і в'язкість:

$$C_c = \sum_{i=1}^n \frac{E_i \cdot S_i}{l_i} \cdot f_i, \quad (1)$$

де  $C_c$  – сумарна пружність елементів реологічної моделі фанери (РМФ), Н/м;  $E_i$  – модуль пружності  $i$ -го елемента РМФ, Н/м<sup>2</sup>;  $S_i$  – площа перерізу  $i$ -го елемента РМФ, м<sup>2</sup>;  $l_i$  – висота  $i$ -го елемента РМФ, м;  $f_i$  – об'ємна частка однорідного  $i$ -го елемента фанери, %;  $n$  – кількість елементів фанери;  $i$  – номер елемента фанери.

$$m_c = \sum_{i=1}^n \rho_i \cdot S_i \cdot l_i \cdot f_i, \quad (2)$$

де  $m_c$  – сумарна маса елементів РМФ, кг;  $\rho$  – щільність  $i$ -го елемента РМФ, кг/м<sup>3</sup>.

$$\eta_c = \sum_{i=1}^n \ln \frac{A_{i_1}}{A_{i_2}} \cdot f_i, \quad (3)$$

де  $\eta_c$  – сумарна в'язкість елементів РМФ, 1/с;  $A_{i_1}$  – амплітуда першого коливання ділянки  $i$ -го елемента РМФ, мм;  $A_{i_2}$  – амплітуда другого коливання ділянки  $i$ -го елемента РМФ, мм.

На рис. 2 представлено реологічну модель фанери, яка може бути використана для встановлення впливу структури фанери (дефектна та бездефектна), на її акустичні характеристики, а саме на форму коливального процесу під час дії ударного впливу.

За механічного впливу на фанеру виникають вимушені коливання. Величина зміщення пластини фанери щодо рівноважного становища становить:

$$\omega = \frac{1}{mf_*} \int_0^t F(\tau) e^{-\eta(t-\tau)} \cdot \sin f_*(t-\tau) d\tau, \quad (4)$$

де  $\omega$  – зсув площини фанери, м;  $m$  – маса ділянки фанери, кг;  $\tau$  – тривалість дії сили  $F$ , с;  $F(\tau)$  – сила, що діє на фанеру, Н;  $f_*$  – частота коливання фанери, 1/с;  $t$  – час коливання, с;  $\eta$  – коефіцієнт, що характеризує в'язкість фанери, 1/с.

Величину перетворення механічного зсуву фанери при імпульсному механічному ударі в електричний сигнал за допомогою п'єзомодуля можна визначити за наступним виразом:

$$Q = \frac{d_{11} \cdot m_\phi \cdot g \cdot k \cdot (1 - e^{-\eta t_1})}{\eta \cdot e^{\eta t}} \cdot (f_* \cdot \sin f_* t + 2\eta \cdot \cos f_* t), \quad (5)$$

де  $Q$  – заряд, що виникає на обкладинках п'єзоелемента, Кл;  $d_{11}$  – коефіцієнт пропорційності, п'єзомодуль, Кл/Н;  $\eta$  – коефіцієнт, що характеризує в'язкість фанери, 1/с;  $t_1$  – час імпульсу сили, яка діє на фанеру, с;  $g$  – прискорення земного

тяжіння,  $m/c^2$ ;  $f_*$  – частота коливання фанери,  $1/c$ ;  $t$  – час коливання,  $c$ ;  $m_\phi$  – маса ділянки фанери,  $кг$ ;  $k$  – коефіцієнт електромеханічного зв'язку п'єзоелемента.



Рис. 2. Реологічна модель фанери

Зважаючи на складність структури об'єкта, теоретичне визначення величини таких параметрів як, наприклад, частота вільних коливань, пов'язане з принциповими труднощами. Це викликало необхідність розроблення експериментальної установки для проведення досліджень з визначення параметрів сигналу.

У третьому розділі «Методика експериментальних досліджень» наведено методику розроблення вдосконаленого методу контролю якості фанери для реалізації відповідного пристрою.

Існуючий класичний ударний метод проводиться за абсолютними значеннями відхилень характеристик коливальних процесів фанери. Зміна мінливих факторів фанери може знизити точність у реалізованому пристрої. Тому розроблено методику вдосконалення ударного методу шляхом проведення вимірювань за відносними характеристиками коливального процесу (рис. 3).



Рис. 3. Блок-схема алгоритму контролю якості фанери вдосконаленим ударним методом

Алгоритм контролю якості фанери вдосконаленого ударного методу полягає в наступному: дія ударника на вимірюваний предмет, імпульс сили ударника передається фанері; в місці удару зміщуються шари фанери, що викликає коливання ділянки фанери; перетворення механічних коливань листа фанери в електричні; аналіз електричного сигналу і визначення в ньому найбільш інформативної ділянки; вимірювання електричного сигналу; зберігання значень сигналу у блоці пам'яті; переміщення ударника на іншу ділянку вимірювання;

порівняння результатів обчислень із заданими значеннями до припустимого рівня відхилення, які розраховуються від необхідної точності контролю якості фанери.

Для проведення експериментальних досліджень було розроблено пристрій контролю якості фанери, до складу якого входить ударний механізм, п'єзодатчик, підсилювач, індикатор, що згідно із запропонованим рішенням додатково містить послідовно з'єднані блок обробки інформації, лінію затримки, компаратор, Т-тригер та лічильник, який з'єднаний з генератором та індикатором (рис. 4).

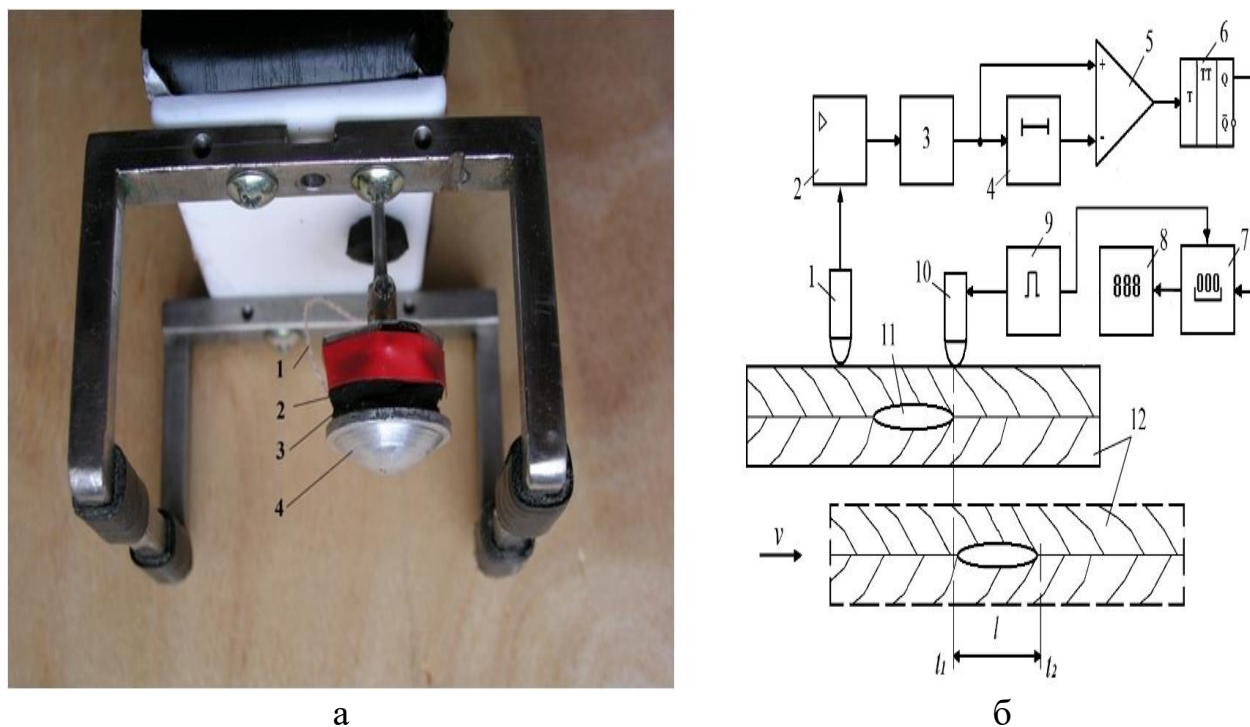


Рис. 4. Пристрій для контролю дефекту ударним методом: а – загальний вигляд: 1 – провідник; 2 – демпфер; 3 – п'єзоелемент; 4 – металевий ударник; б – структурна схема: п'єзодатчик 1, підсилювач 2, блок обробки інформації (спектроаналізатор) 3, лінія затримки 4, компаратор 5, Т-тригер 6, лічильник 7, індикатор 8, генератор 9, ударний механізм 10, дефект 11, контрольований виріб 12.

Для досліджень впливу розшарування на сигнал ударного датчика використано зразки фанери з ПАТ «Фанери та плити» товщиною 7 мм, 10, 14, 18, 22 мм. Дефект розшарування останньої змодельовано склеюванням зразків із запланованою площею від  $S_1=0,0079 \text{ м}^2$  до  $S_2=0,042 \text{ м}^2$  і глибиною від 0,004 до 0,02 м (рис. 5).

Кількість спостережень пошукового досліду дорівнювала 100. Визначено, що розподіл параметра сигналу ударного датчика, кількості імпульсів, підпорядковується нормальному розподілу (рис. 6). Гіпотезу про нормальний розподіл перевірено за допомогою показників асиметрії та ексцесу.

Отже, це дало підстави для розрахунку параметрів описової статистики в програмі STATISTICA за допомогою модуля Descriptive statistics. Розраховано коефіцієнт варіації  $v=8,11 \%$  та кількість спостережень при постановці експерименту  $N=10$ . Розраховано критерій Стьюдента 1,96, що дозволяє досягнути точності експерименту  $p \leq 5 \%$ .

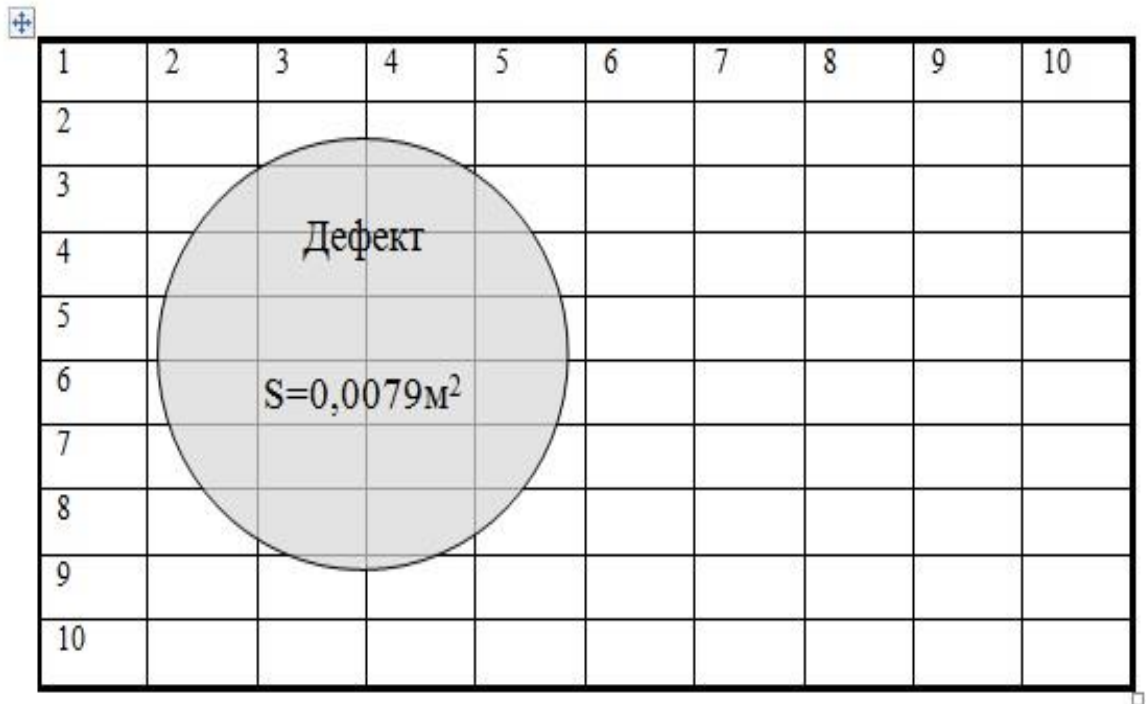


Рис. 5. Схема моделювання дефекту розшарування на досліджуваному зразку фанери

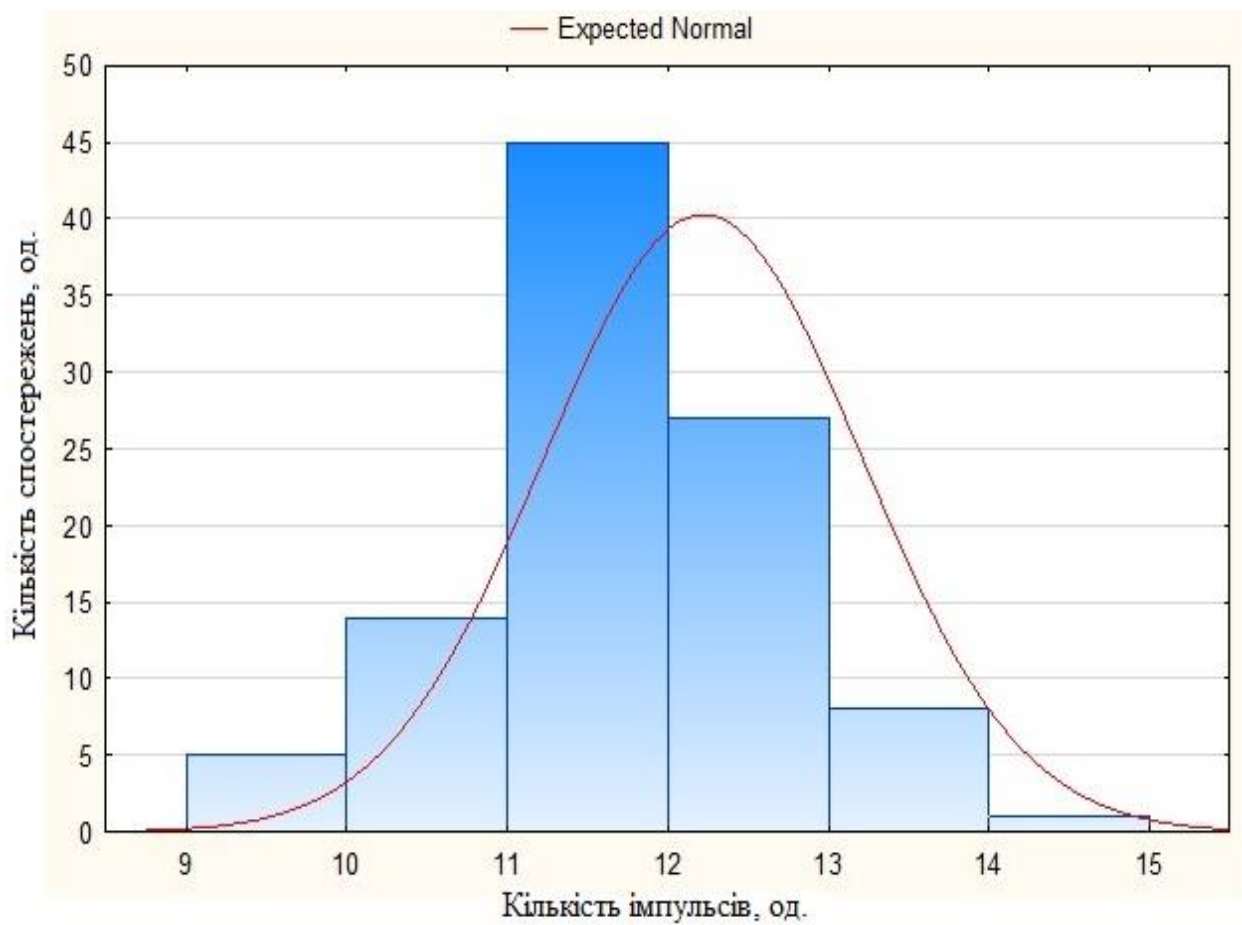


Рис. 6. Графік розподілу кількості імпульсів сигналу ударного датчика

У четвертому розділі «Результати експериментальних досліджень» описано експериментальну установку для визначення дефектів фанери, за допомогою якої проведено серію експериментів з метою встановлення якості останньої.

Експериментальні дослідження виконувалися на установці (рис. 7, а), що складається з ударного датчика, який через блок комутації підключається до комп'ютера та п'єзоелементу, який через той же блок комутації виводиться на модуль осцилографа. Живлення всієї установки здійснюється безпосередньо від USB-портів комп'ютера (5В).

Осцилограма сигналу ударного датчика (рис. 7, б) має три характерні зони. Так, перша зона – це момент контакту ударника і пластини, друга – встановлення вимушених коливань пластини, третя зона – власні коливання пластини. Інформативною є друга ділянка, на якій обрано тимчасові ділянки і отримано відповідні характеристики сигналу. Це дозволило визначити вихідні параметри у досліді: кількість імпульсів  $n$ , частота вільних коливань  $f$ , коефіцієнт гармонійних спотворень  $K_2$  вихідного сигналу п'єзоелемента ударного датчика.

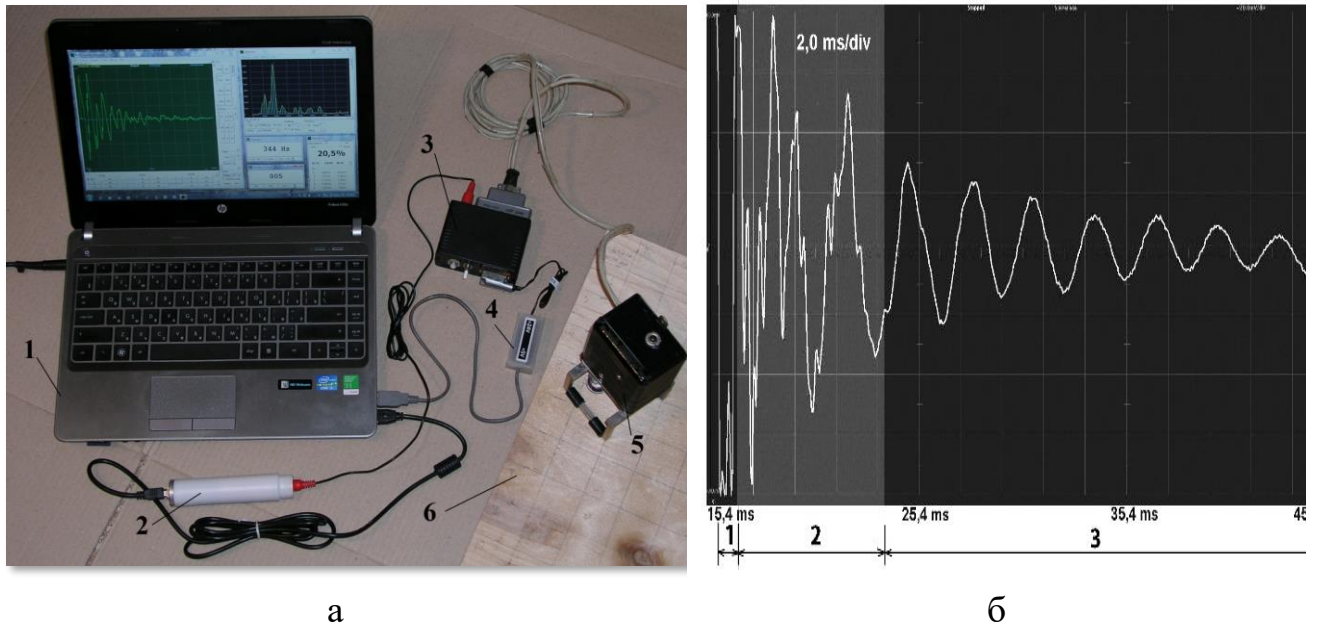


Рис. 7. Експериментальна установка для контролю якості фанери: а) загальний вигляд: 1 – комп'ютер; 2 – модуль осцилографа Oscill; 3 – блок комутації та формування імпульсів для ударного датчика; 4 – перетворювач напруги 5В/24В; 5 – ударний датчик; 6 – зразок фанери; б) осцилограма вихідного сигналу п'єзоелемента ударного датчика.

Факторами, що впливають на вихідний сигнал обрано: глибину залягання дефекту  $x_1$ , місце його розташування  $x_2$  у зразку, площу дефекту  $x_3$  (табл. 1).

Реалізування повного факторного експерименту дало змогу отримати адекватні регресійні залежності впливу характеристик дефекту на параметри сигналу ударного датчика на бездефектній та дефектній ділянках:

Параметри факторів

№ з/п	Фактор	Значення фактора			
		нижній рівень	верхній рівень	середній рівень	інтервал варіювання
1	$x_1$ , м	0,004	0,018	0,011	0,007
2	$x_2$ , (1 – дефект всередині зразка; 2 – дефект на краю зразка)	1	2	1,5	0,5
3	$x_3$ , м <sub>2</sub>	0,0079	0,042	0,02495	0,01705

– кількість пульсацій сигналу ударного датчика на бездефектній та дефектній ділянках:

$$n_{\text{норм. б. д.}} = 8,98 + 0,78x_1 - 1,4x_2 + 0,48x_1x_3 - 0,45x_1x_2 + 1,4x_2x_3 + 0,5x_1x_2x_3, \quad (6)$$

$$n_{\text{норм. з. д.}} = 11,06 + 0,24x_1 - 3,59x_2 - 0,61x_3 + 1,39x_1x_2 - 0,89x_1x_3 + 1,01x_1x_2x_3; \quad (7)$$

– частота вільних коливань сигналу ударного датчика на бездефектній та дефектній ділянках:

$$f_{\text{норм. б. д.}} = 2832 - 333,1x_1 - 505,1x_3 + 1570x_2 + 359,6x_1x_2 + 301,4x_1x_3 + 303,4x_2x_3, \quad (8)$$

$$f_{\text{норм. з. д.}} = 1128 + 121x_1 - 187x_3 + 167x_1x_2 + 130,4x_2x_3 - 75,7x_1x_2x_3; \quad (9)$$

– коефіцієнт гармонійних спотворень сигналу ударного датчика на бездефектній та дефектній ділянках:

$$K_{\text{норм. б. д.}} = 18,5 + 5,39x_1 - 12,6x_2 + 0,03x_3 - 3,52x_1x_3 - 4,23x_1x_2 + 3,5x_1x_2x_3, \quad (10)$$

$$K_{\text{норм. з. д.}} = 42,7 - 5,31x_1 + 10,3x_2 + 0,32x_3 - 3,47x_1x_3 - 2,96x_2x_3 + 5,96x_1x_2x_3. \quad (11)$$

Можливість використання запропонованих параметрів вихідного сигналу ударного датчика для дефектоскопії фанери перевірено на однорідність дисперсій експериментальним даним за критерієм Фішера та середніх значень за критерієм Стьюдента.

На рис. 8 наведено візуалізацію регресійного аналізу впливу характеристик дефекту на параметри вихідного сигналу ударного датчика.

За цим рисунком видно, що вплив усіх досліджуваних факторів на кількість пульсацій вихідного сигналу ударного датчика майже однаковий (рис. 8, а, б). Найбільшою мірою на вихідний параметр частоти вільних коливань впливає місце розташування дефекту, що позитивно для використання вказаного параметру для контролю, проте він не чутливий до визначення площі дефекту (рис. 8, в, г).

Виявлено, що найчутливішим параметром, який визначає не лише наявність дефекту в фанері, а і його площу є коефіцієнт гармонійних спотворень (рис. 8, д, е).

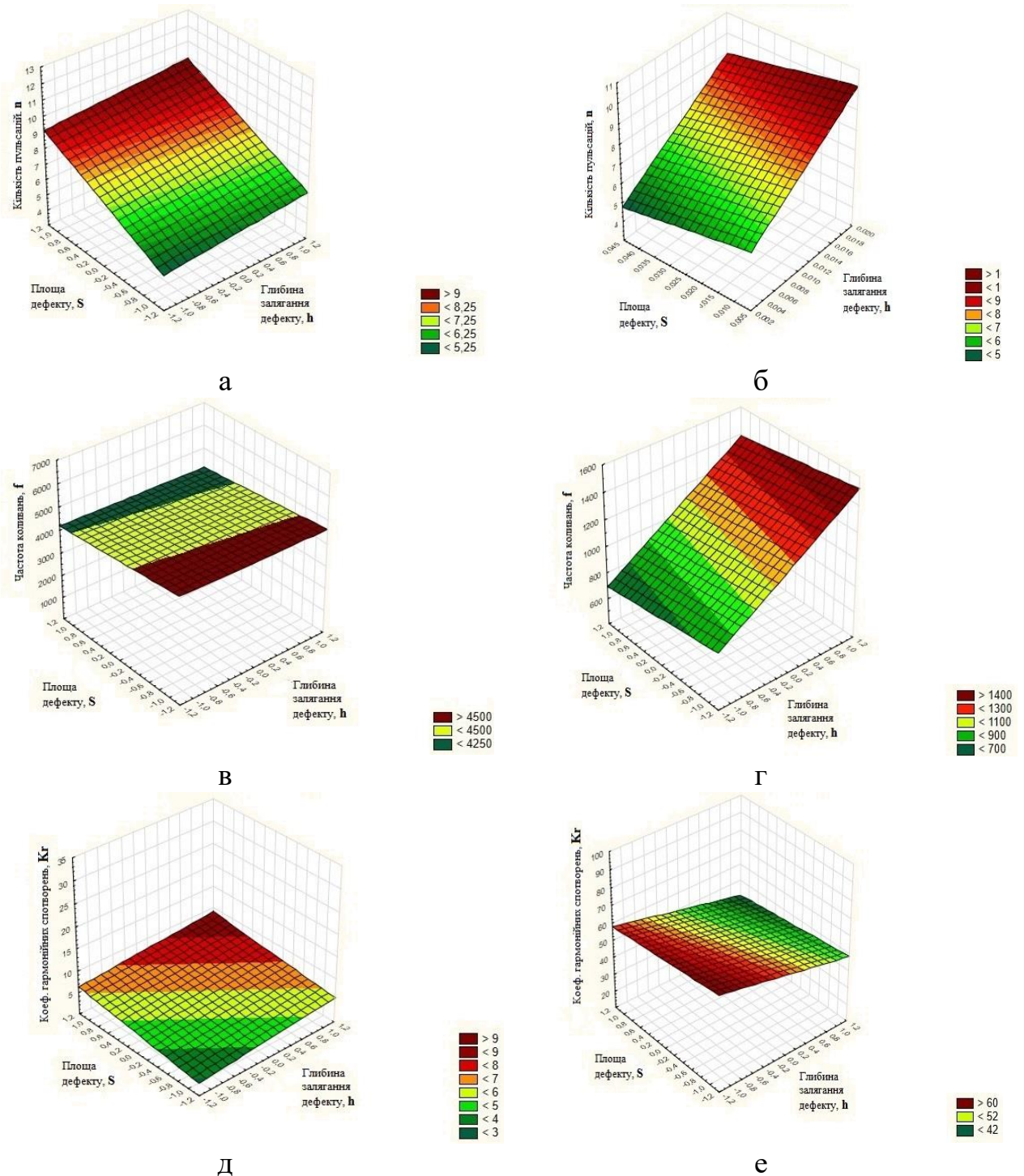


Рис. 8. Вплив характеристик дефекту фанери на параметри сигналу ударного датчика на бездефектній та дефектній ділянках: а, б – кількість пульсацій сигналу ударного датчика; в, г – частота вільних коливань сигналу ударного датчика; д, е – коефіцієнт гармонійних спотворень сигналу ударного датчика.

На рис. 9 представлено гістограму чутливості вихідних параметрів сигналу ударного датчика до параметрів дефекту, яка підтверджує попередній регресійний аналіз.

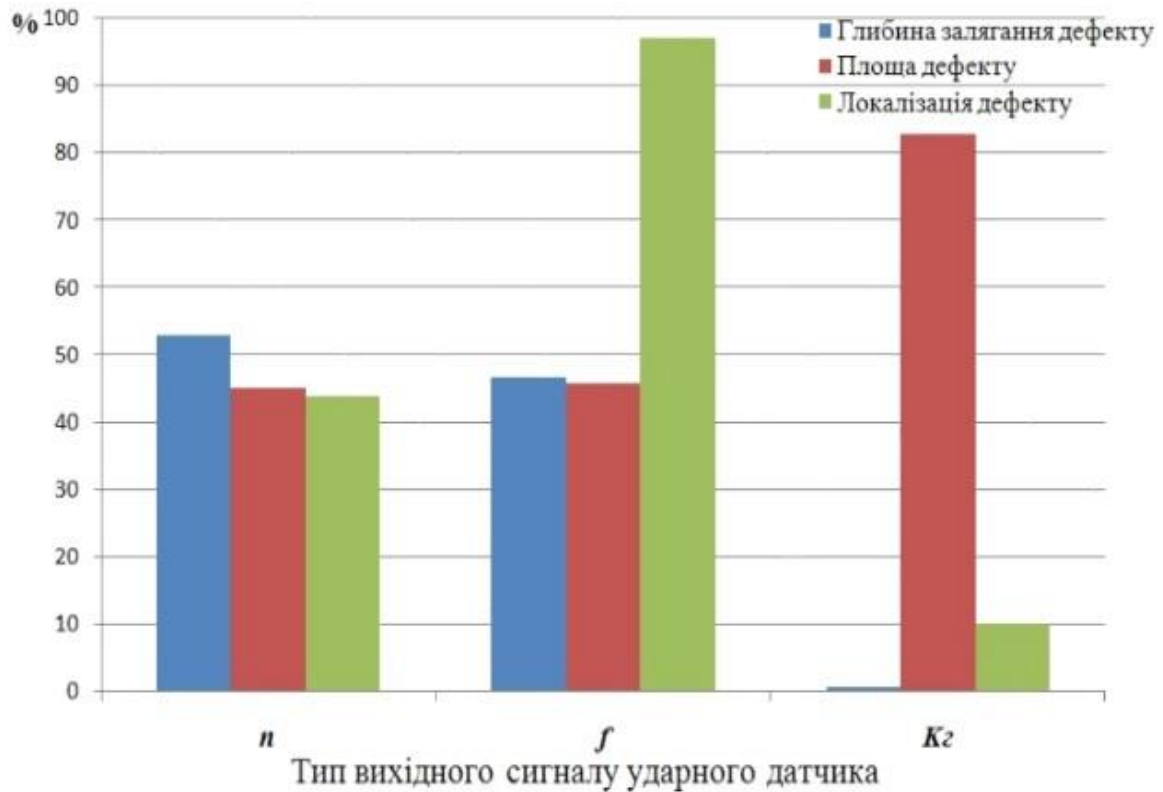


Рис. 9. Гістограма чутливості вихідних параметрів сигналу ударного датчика

Отже, для контролю якості фанери ударним методом раціонально використовувати параметр коефіцієнта гармонійних спотворень.

У п'ятому розділі «**Реалізація результатів досліджень**» представлено результат порівняння ударного методу з ультразвуковим, запропоновано критерій визначення якості фанери, що дало змогу розробити структуру багатоканального автоматизованого пристрою контролю якості фанери та обґрунтувати економічну ефективність його використання.

За результатами експериментальної оцінки впливу дефекту на вихідні параметри сигналу ударного датчика, в місці дефекту та біля нього сигнал має низьке значення, тоді як на бездефектній ділянці – дещо вище (рис. 10 а, б, в).

Для перевірки отриманих результатів на тих же самих зразках за допомогою ультразвукового дефектоскопа було визначено характеристики розподілу сигналу (рис. 10, г). Одержані результати ультразвукових досліджень майже повністю співпадають з такими вдосконаленого ударно-акустичного методу, особливо з коефіцієнтом гармонійних спотворень (коефіцієнт кореляції  $k_{v,K_r}=0,84$ ). Це підтверджує можливість застосування ударного методу для дефектоскопії фанери.

Аналіз вихідних параметрів ударного датчика дозволив виявити залежність зміни амплітуди власної частоти коливання фанери від наявності в ній гармонійних коливань, які виникають за наявності дефекту:

$$K_{\text{я}} = \frac{A_1 - \sum_{i=2}^n A_i}{A_1}, \quad (12)$$

де  $A_1$  – амплітуда власної частоти коливання листа фанери, м;  $A_i$  – амплітуда  $i$ -го гармонійного коливання фанери, м;  $n$  – кількість контрольованих гармонійних коливань;  $i$  – номер гармонійного коливання.

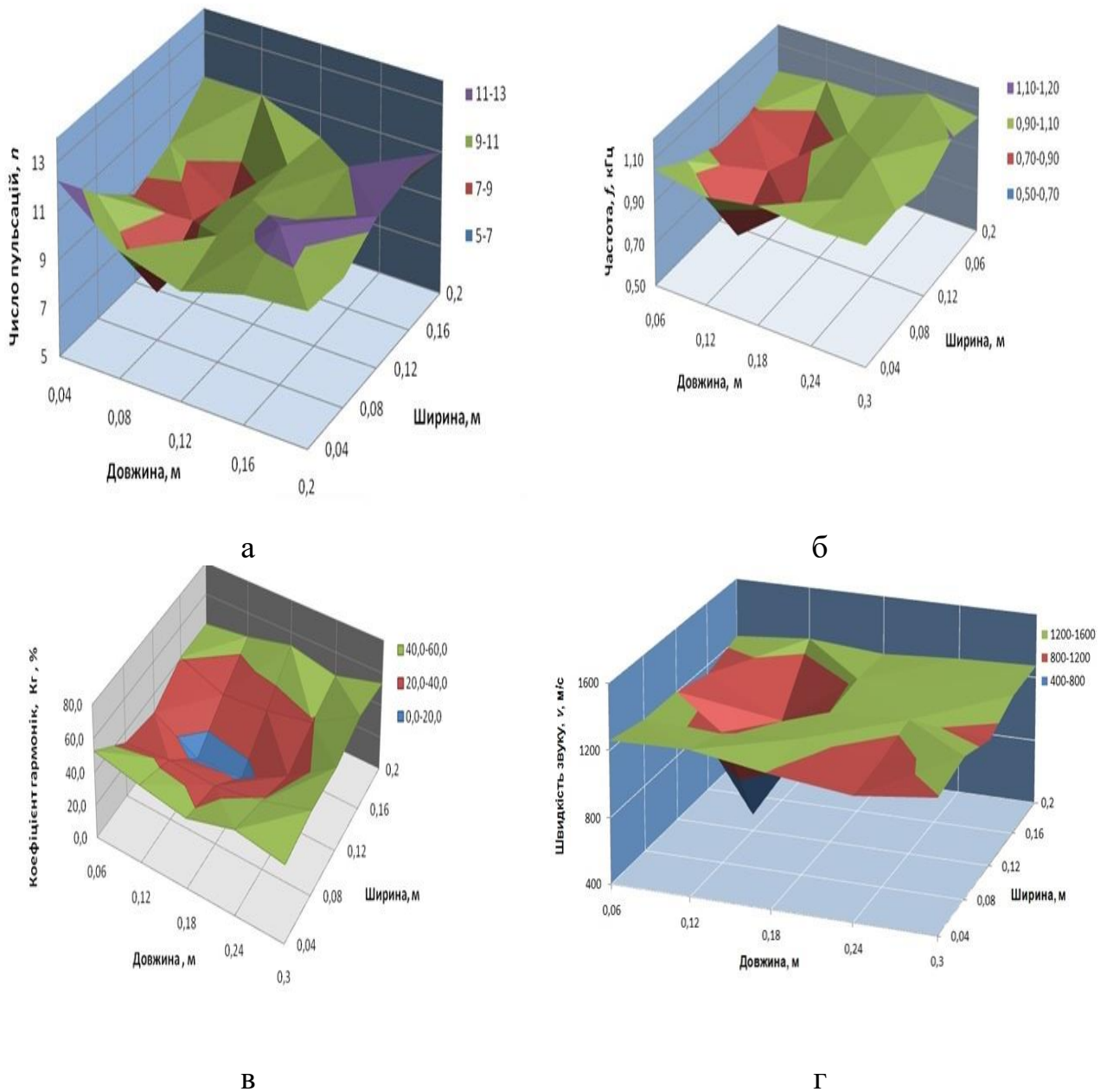


Рис. 10. Результати експериментальної оцінки впливу дефекту на вихідний сигнал ударного датчика: а – кількість пульсацій, б – частота вільних коливань, в – коефіцієнт гармонійних спотворень, г – швидкість звуку.

При перетворенні механічних величин коливань фанери в електричні значення критерію якості фанери дорівнює:

$$K_{\text{я}} = \frac{U_1 - \sum_{i=2}^n U_i}{U_1}, \quad (13)$$

де  $U_1$  – амплітуда власної частоти коливання листа фанери, В;  $U_i$  – амплітуда  $i$ -го гармонійного коливання листа фанери, В;  $i$  – номер гармонійного коливання.

На рис. 11 наведено залежності величини критерію якості та параметрів вихідного сигналу ударного датчика: коефіцієнта гармонійних спотворень, власної частоти коливань фанери та кількості пульсацій. Визначено, що за наявності дефекту величина критерію якості фанери наближається до 1, при бездефектній фанері величина критерію якості не перевищує 0,1.

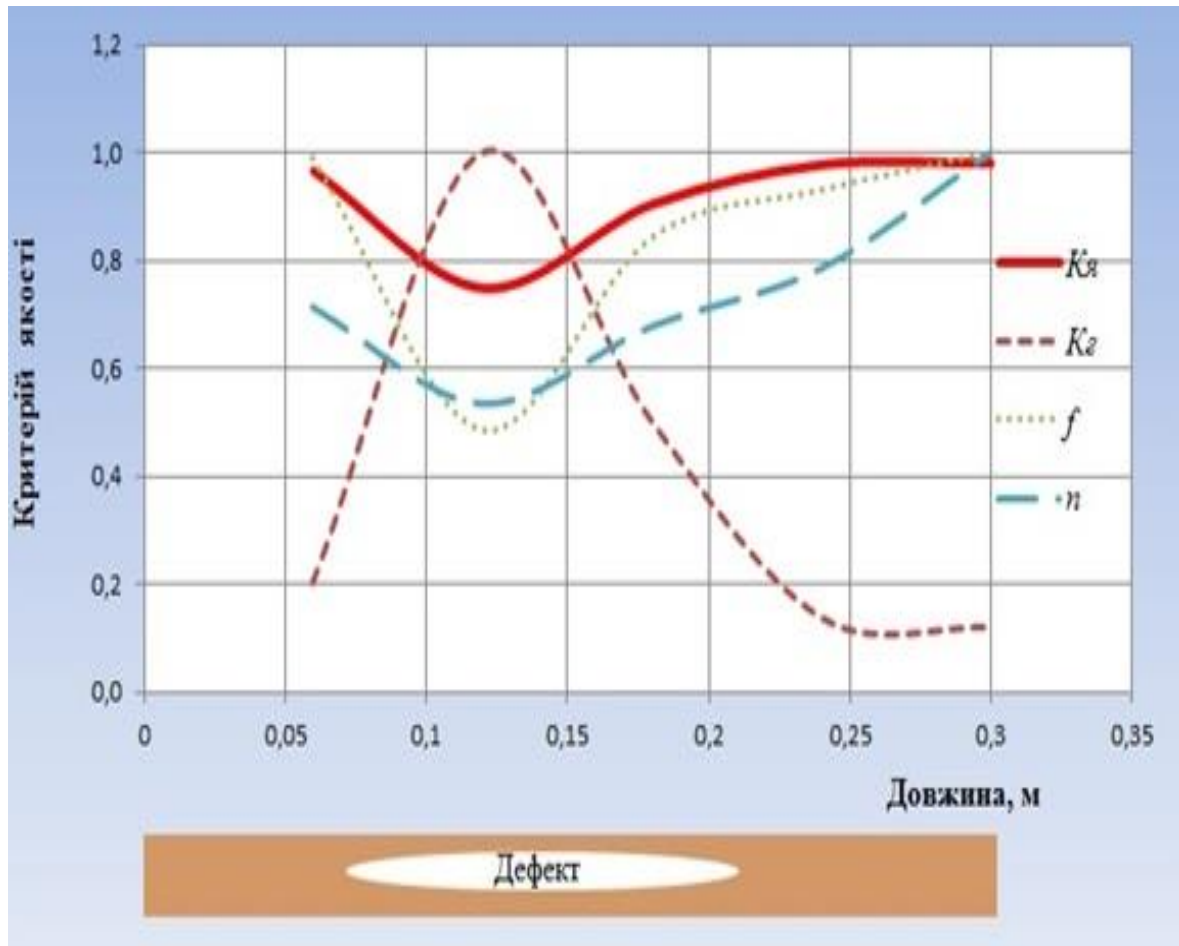


Рис. 11. Залежність величини критерія якості від стану фанери

Проведені дослідження дозволили сформулювати вимоги до розроблення структури багатоканального автоматизованого пристрою контролю якості фанери для неруйнівного контролю дефектів (розшарувань) у процесі виробництва та її наступного автоматизованого селективного сортування (рис. 12). Установка складається з масиву п'єзодатчиків, суміщених з ударними перетворювачами (УД1...УД10) 1 та вимірювальних каналів (ВК1...ВК10), кожен з яких містить підсилювач 2, блок обробки інформації (спектроаналізатор) 3, лінію затримки 4, компаратор 5, Т-тригер 6, лічильник 7, що підключені до мікропроцесора 8, індикатор 9, генератор 10, керуючий перетворювач 11, електромотор 12, стіл для автоматизованої подачі фанери 13, контрольований виріб 14.

Запропонована система дозволяє здійснювати автоматизовану дефектоскопію фанери, інформація про стан процесу може бути передана як працівникам складу, так і транспортному роботу, а також на виробничу лінію з метою проведення аналізу та виявлення причин виникнення дефекту і корекції параметрів технологічного процесу.

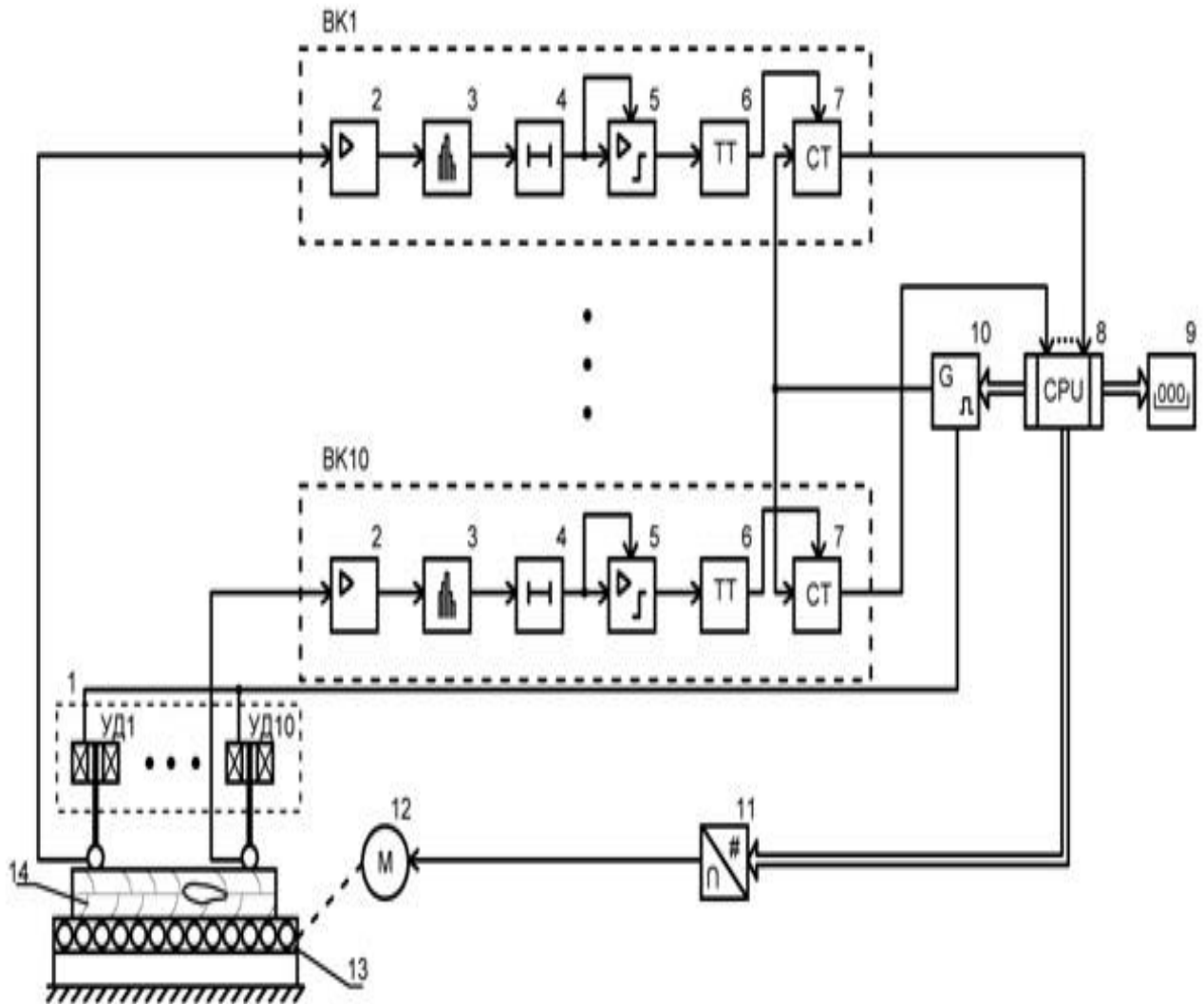


Рис. 12. Багатоканальний автоматизований пристрій контролю якості фанери

При впровадженні у виробничий процес середньостатистичного підприємства з обсягом випуску фанери 5 тис. м<sup>3</sup>/рік, розробленої установки контролю якості фанери, кількість працівників на операції сортування зменшиться вдвічі. За рахунок вилучення дефектної фанери з операції шліфування витрати на електроенергію зменшаться на 19,8 %.

## ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі вирішено науково-практичне завдання вдосконалення ударно-акустичного методу контролю якості фанери, яка реалізується в технологічному процесі її виробництва.

1. Аналіз неруйнівних методів композиційних матеріалів, деревини, клеєних деревних матеріалів показав, що існуючі методи контролю якості не відповідають зростанню сучасних вимог до якості дефектоскопії фанери. Ці методи залежать від таких властивостей деревини, як порода, вологість, стан поверхні та інших, що суттєво впливає на якість контролю. Крім того, їх застосування потребує складного й дорогого устаткування або введення додаткових операцій в технологічний режим, що не дозволяє автоматизувати процес.

2. Розроблено математичну модель, яка базується на реологічних властивостях фанери і описує послідовність перетворення механічного зсуву пластини фанери у величину електричного сигналу, що виникає на п'єзомодулі під час ударного впливу, і обґрунтовує параметри для розроблення пристрою контролю якості фанери.

3. Вдосконалено ударно-акустичний метод контролю якості фанери, який проводиться за відносними характеристиками, що дозволяє не враховувати вплив похибок мінливих факторів фанери на осцилограмі сигналу ударного датчика пристрою контролю якості фанери (патент на корисну модель № 109890), тобто, це дає можливість виявляти дефекти площею від 0,0079 до 0,042 м<sup>2</sup> і глибиною залягання від 0,004 до 0,02 м. Такий підхід став підґрунтям для створення структури багатоканального автоматизованого пристрою контролю якості фанери (патент на корисну модель № 114684), що вписується в автоматизовану технологічну лінію виробництва.

4. Результати пошукових експериментів дозволили визначити інформативні параметри обробки сигналу, такі як кількість пульсацій  $n$ , частота вільних коливань  $f$  та коефіцієнт гармонійних спотворень  $K_2$ . Під час основного експерименту визначено, що для виявлення місця розташування дефекту у фанері найдоцільніше використовувати параметр частоти вільних коливань, а для визначення площі дефекту – коефіцієнт гармонійних спотворень.

5. Порівняння з відомим, найбільш точним ультразвуковим методом контролю виявило, що найбільшу кореляцію з ультразвуком ( $k_{v,K_2} = 0,84$ ) має такий параметр ударного датчика як коефіцієнт гармонійних спотворень, що дає підстави рекомендувати ударний метод для визначення площі дефекту фанери.

6. Запропоновано критерій оцінки якості фанери, який виражає величину відсотка амплітуд гармонійних коливань у відношенні до власної частоти коливання фанери, що для бездефектної фанери становить  $< 0,1$ , тоді як для дефектної ділянки його значення наближуються до 1,0.

7. Вдосконалений ударно-акустичний метод і пристрій контролю якості фанери перевірено у виробничих умовах і впроваджено для використання на ПАТ «Фанери та плити».

8. Економічний ефект від впровадження у виробництво підприємства з обсягом випуску 5 тис. м<sup>3</sup> фанери у рік розробленої установки контролю якості фанери для визначення внутрішніх дефектів полягає у зменшенні кількості працівників, що заощадить витрати фонду заробітної плати на 200 тис. грн на рік і електроенергію на 19,8 % за рахунок вилучення дефектної фанери з подальших операцій оброблення.

## СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

### Статті у наукових фахових виданнях України:

1. Баранова О. С. Дефектоскопія композитних матеріалів з застосуванням ударно-акустичного методу неруйнівного контролю // Вісник Київського національного університету технологій та дизайну. 2015. № 6 (92). С. 150–156.

2. Головач В. М., **Баранова О. С.** Аналіз впливу характеристик дефекту фанери на кількість пульсацій вихідного сигналу ударного датчика // Науковий вісник Національного лісотехнічного університету України. 2015. № 25.10. С. 280–285. *(Здобувачем особисто проведено аналіз впливу характеристик дефектів фанери на сигнал ударного датчика, проведено експериментальні дослідження).*

3. Головач В. М., **Баранова О. С.** Вплив характеристик дефектів фанери на коефіцієнт гармонійних спотворень вихідного сигналу ударного датчика // Технічні науки та технології. 2016. № 2 (4). С. 195–199. *(Здобувачем особисто проведено та опрацьовано результати експериментальних досліджень).*

4. Головач В. М., **Баранова О. С.** Аналіз характеристик сигналу при контролі дефектів фанери // Науковий вісник Національного університету біоресурсів і природокористування України. Серія «Лісництво та декоративне садівництво». 2016. Вип. 238. С. 239–246. *(Здобувачем особисто проведено та опрацьовано результати експериментальних досліджень).*

5. **Баранова О. С.**, Василенко М. П., Скрипник І. Ю., Головач В. М. Неруйнівний контроль якості фанери з автоматизованим селективним сортуванням // Науковий вісник Національного лісотехнічного університету України. 2016. № 26.4. С. 251–255. *(Здобувачем особисто запропоновано метод контроль якості фанери з автоматизованим селективним сортуванням).*

6. **Баранова О. С.**, Головач В. М. Порівняльний аналіз ударно-акустичного та ультразвукового методів дефектоскопії фанери // Науковий вісник Національного лісотехнічного університету України. 2016. № 26.5. С. 241–245. *(Здобувачем особисто поставлено задачу, проведено експериментальні дослідження та розрахований коефіцієнт кореляції між двома методами).*

**Стаття у науковому фаховому виданні України,  
включеному до міжнародних наукометричних баз даних**

7. Головач В. М., **Баранова О. С.** Аналіз реакції елементів фанери на ударні впливи: [електронний ресурс] // Лісове і садово-паркове господарство. 2015. № 8. Режим доступу до статті: [http://ejournal.studnubip.com/zhurnal-8/ukr/holovach\\_baranova/](http://ejournal.studnubip.com/zhurnal-8/ukr/holovach_baranova/). *(Здобувачем особисто поставлено задачу, розроблено математичний аналіз впливу удару на властивості фанери).*

**Статті у наукових виданнях інших держав:**

8. **Olha Baranova, Valentyn Golovach, Mykola Vasylenko.** Research of method for automated non-destructive testing of plywood // Annals Warsaw University of Life Sciences. SGGW Forestry and Wood Technology. 2016. № 94. P. 14–19 *(Здобувачем особисто запропоновано метод підвищення якості фанери).*

9. Головач В. М., **Баранова О. С.** Исследование влияния дефектов фанеры на параметры выходного сигнала ударного датчика // Труды Белорусского государственного технологического университета. Лесная и деревообрабатывающая промышленность. 2016. № 2 (184). С. 212–216.

*(Здобувачем особисто проведено експериментальні дослідження та опрацьовано їх результати).*

#### **Статті в інших виданнях:**

10. Головач В. М., **Баранова О. С.** Кореляційний аналіз вихідних сигналів ударного датчика при неруйнівному контролі дефектів фанери // Вісник Харківського національного університету сільського господарства імені Петра Василенка. Деревооброблювальні технології та системотехніка лісового комплексу. 2016. Вип. 169. С. 64–69. *(Здобувачем особисто проведено та опрацьовано результати експериментальних досліджень).*

11. Головач В. М., **Баранова О. С.** Аналіз кореляції параметрів вихідного сигналу ударно-акустичного та ультразвукового методів дефектоскопії фанери // Современные строительные конструкции из металла и древесины. 2016. № 20. С. 27–32. *(Здобувачем особисто проведені експериментальні дослідження і математичні розрахунки).*

#### **Патенти на корисну модель:**

12. Патент на корисну модель № 109890 Україна, МПК G01N33/46, G01N29/04. Пристрій контролю якості фанери. Головач В. М., Пінчевська О. О., **Баранова О. С.**; заявник та патентовласник Національний університет біоресурсів і природокористування України. № 2016 у 03295; заявлено 30.03.2016; опубліковано 12.09.2016; Бюл. № 17. *(Здобувачем особисто запропоновано формулу винаходу на корисну модель).*

13. Патент України на корисну модель № 113662, МПК G01N33/46, G01N19/08, G01N3/32, G01N3/34, B07C5/28, B07C5/34. Пристрій контролю якості та автоматизованого селективного сортування фанери. Скрипник І. Ю., Пінчевська О. О., Василенко М. П., **Баранова О. С.**, Головач В. М., Сірко З. С.; заявник та патентовласник Національний університет біоресурсів і природокористування України; Український держаний науково-дослідний інститут «Ресурс». № 2016 у 07883; заявлено 18.07.2016; опубліковано 10.02.2017; Бюл. № 3. *(Здобувачем особисто запропоновано формулу винаходу на корисну модель).*

14. Патент України на корисну модель № 114684, МПК G01N29/04. Багатоканальний автоматизований пристрій контролю якості фанери. Головач В. М., Василенко М. П., Пінчевська О. О., **Баранова О. С.**, Сірко З. С.; заявник та патентовласник Національний університет біоресурсів і природокористування України; Український держаний науково-дослідний інститут «Ресурс». № 2016 у 10656; заявлено 24.10.2016; опубліковано. 10.03.2017; Бюл. № 5. *(Здобувачем особисто запропоновано формулу винаходу на корисну модель).*

#### **Тези наукових доповідей:**

15. Баранова О. С. Цифрове моделювання частотних характеристик плит композитного матеріалу // Вимірювання, контроль та діагностика в технічних

системах: третя Міжнародна наукова конференція, м. Вінниця, 27–28 жовтня 2015 року: тези доповіді. Вінниця, 2015. С. 116–117.

16. Баранова О. С. Вплив фізико-механічних чинників композитного матеріалу на вихідний сигнал п'єзоперетворювача // Фізичні процеси та поля технічних і біологічних об'єктів: XIV Міжнародна наукова технічна конференція, м. Кременчук, 2015 рік: тези доповіді. Кременчук, 2015. С. 104–106.

17. **Баранова О. С.**, Головач В. М. Неруйнівний контроль якості фанери ударно-акустичним методом // Актуальні проблеми лісового сектору та садово-паркового господарства: Міжнародна науково-практична конференція, м. Київ, 14–15 квітня 2016 року: тези доповіді. К., 2016. С. 181–182 (*Здобувачем особисто запропоновано метод підвищення якості фанери*).

18. Головач В. М., **Баранова О. С.** Порівняльний аналіз кореляції між вихідними сигналами ударного та ультразвукового методів контролю якості фанери // Комплексне забезпечення якості технологічних процесів та систем: VI Міжнародна науково-практична конференція, м. Чернігів, 26–29 квітня 2016 року: тези доповіді. Чернігів, 2016. С. 165–166. (*Здобувачем особисто проведений аналіз результатів експериментальних досліджень*).

## АНОТАЦІЯ

**Баранова О. С. Дефектоскопія фанери ударно-акустичним методом.** – На правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук зі спеціальності 05.23.06 «Технологія деревообробки, виготовлення меблів та виробів з деревини». – Національний університет біоресурсів і природокористування України, Київ, 2017.

Дисертаційну роботу присвячено розв'язанню актуального науково-практичного завдання – застосування ударного неруйнівного методу контролю якості фанери, яка базується на основних положеннях теорії коливань і враховує вплив технологічних особливостей процесу. Представлено аналіз сучасних методів неруйнівного контролю якості деревини та композиційних матеріалів. Проведено аналіз реологічних властивостей фанери та досліджено залежність електричного сигналу п'єзомодуля від механічного зсуву пластин фанери. Вдосконалено ударно-акустичний метод та розроблено пристрій для неруйнівного контролю якості фанери. Визначено найраціональніші параметри для дефектоскопії фанери. Встановлено високу кореляцію ультразвукового методу з вихідним параметром ударного методу, коефіцієнтом гармонійних спотворень. Запропоновано критерій якості фанери, як кількісний вміст гармонійних коливань в основному коливанні листа фанери. Встановлено економічну ефективність від використання установки контролю якості фанери для визначення внутрішніх дефектів, що дозволяє зменшити кількість працівників на операції контролю вдвічі та заощадити електроенергію на 19,8 %.

**Ключові слова:** фанера, реологічні властивості, ударний метод, дефектоскопія, контроль якості, параметр, критерій, коливання, використання.

## АННОТАЦИЯ

**Баранова О. С. Дефектоскопия фанеры ударно-акустичним методом.** – На правах рукописи.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.23.06 «Технология деревообработки, изготовления мебели и изделий из древесины». – Национальный университет биоресурсов и природопользования Украины, Киев, 2017.

Диссертация посвящена решению актуальной научно-практической задачи – применения ударного неразрушающего метода контроля качества фанеры, которая базируется на основных положениях теории колебаний и учитывает влияние технологических особенностей процесса.

Проанализированы современные методы неразрушающего контроля качества древесины, клееных древесных и композиционных материалов, что позволило обосновать выбор акустического метода для дефектоскопии фанеры. Предложено рассматривать шпон, воздушную прослойку и шары клея как элементы с определенной массой, вязкостью и упругостью, что дает возможность представить реологическую модель фанеры с дефектом как неоднородную колебательную систему разных сред, а без дефекта – как однородную. Определена величина смещения  $\omega$  пластины фанеры относительно равновесного положения при механическом воздействии на нее. Рассчитана величина преобразования механического смещения фанеры при импульсном ударе в электрический сигнал  $Q$  с помощью пьезомодуля.

Разработана методика усовершенствования ударного метода контроля качества фанеры путем проведения измерений по относительным характеристикам колебательного процесса, что позволяет не учитывать непостоянные факторы фанеры (порода древесины, состояние поверхности и т. д.) и уменьшить вероятность появления погрешности. Предложенный ударный метод позволил разработать прибор контроля качества фанеры, которым проведены исследования влияния расслоения в фанере на сигнал ударного датчика. Дефект был смоделирован путем склеивания образцов с запланированной площадью (от  $S_1=0,0079 \text{ м}^2$  до  $S_2=0,042 \text{ м}^2$ ) и глубиной (от 0,004 до 0,02 м) расслоения.

Определены параметры выходного сигнала ударного датчика (количество импульсов, частота свободных колебаний и коэффициент гармонических искажений), которые выбраны на втором временном участке осциллограммы, который отображает установление вынужденных колебаний фанеры. Предложено использовать место расположения дефекта, его глубину и площадь как факторы, которые влияют на выходной сигнал ударного датчика.

Получены адекватные уравнения регрессии зависимости влияния факторов дефекта на параметры сигнала ударного датчика на бездефектных и дефектных участках фанеры. Исследовано, что в месте дефекта и возле него сигнал имеет низкое значение, тогда как на бездефектном участке сигнал увеличивается. Определено, что рационально использовать параметр частоты свободных колебаний для выявления места расположения дефекта, а параметр коэффициента гармонических искажений – для площади дефекта. Установлено, что наибольшую

корреляцию ( $k_{v,K_r}=0,84$ ) с наиболее точным ультразвуковым методом имеет параметр коэффициента гармонических искажений, что позволяет рекомендовать ударный метод для дефектоскопии площади непрочлея фанеры.

Предложен критерий качества фанеры, который отображает величину процента амплитуд гармонических искажений по отношению к собственной частоте колебания таковой. Разработано многоканальное автоматизированное устройство контроля качества фанеры, что позволяет контролировать и своевременно выявлять причины появления дефекта.

Экономический эффект от внедрения разработанной установки на предприятии с объемом выпуска 5 тыс. м<sup>3</sup>/год позволяют сократить количество работающих на операции сортирования вдвое, и за счет извлечения дефектной фанеры из операции шлифования сэкономить на 19,8 % электроэнергию.

**Ключевые слова:** фанера, реологические свойства, ударный метод, дефектоскопия, контроль качества, параметр, критерий, колебания, использование.

## ANNOTATION

**Baranova O. S. Plywood non-destructive testing with shock-acoustic method.** – The manuscript.

The thesis is for Candidate Degree of Technical Sciences with speciality 05.23.06. «Technology Wood Working, Furniture and Wood Products». – The National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine, Kyiv, 2017.

The thesis is devoted to the actual scientific and practical task of shock non-destructive testing method for plywood quality estimation that is based on oscillations theory basic statements and considers the influence of process technological features. Given the analysis of modern wood and composite materials non-destructive testing methods. Held the analysis of plywood reological properties and investigated the dependancy between the piezo module electric charge and plywood plate mechanical displacement. Improved shock-acoustic method and developed non-destructive testing instrument for plywood. Determined the best parameters for plywood non-destructive testing. Found strong correlation between the ultrasonic method and output parameters of shock method that is harmonic distortions coefficient. Proposed the plywood quality criteria as the number of harmonic oscillations in the main plywood plate oscillation. Determined the economic efficiency of plywood quality control device to locate the plywood inner defects that allow to decrease the number of personnel in double and save the electricity for 19,8 %.

**Key words:** plywood, reological properties, shock method, non-destructive testing, quality control, parameter, criteria, oscillations, use.