

4. Wagenfuhr R., 1996. Holzatlas, Fachbuchverlag Leipzig, (123 с., 75-76 с., 331-332 с., 407-408 с., 241-242 с.)

The main characteristic of tropical timber is constant average diameter and density of the trachea within the annual ring. The borders between the rings is less visible or missing. Many species that are similar in type and location of the anatomical elements are difficult to distinguish one from another, but can be distinguished by quantitative anatomical parameters values.

The work examines the various dimensions of the anatomical elements in several tropical tree species.

Measured are the dimensions of the cells and rays, ensuring their variation. A comparison is made between the anatomical characteristics of the individual species.

Wood, tropical wood species, trachea, rays, fibers.

Основна характеристика тропічної деревини – це постійна середня величина діаметра й щільність трахей у межах кільця. Границя між кільцями в них або відсутня, або ледве помітна. Безліч видів, схожих по виду й розташуванню анатомічних елементів важко помітні, але можуть бути розмежовані по кількісних характеристиках анатомічних показників.

У даному дослідженні розглядаються відмінності в розмірах анатомічних елементів у декількох тропічних деревних видів.

Обмірювані розміровид кліток і променів з відстеженням їх варіювання. Зроблене порівняння між анатомічними характеристиками окремих видів.

Деревина, тропічні деревні види, трахеї, серцевинні промені, волокна.

УДК 684.4.04

НЕЛІНІЙНА ДИНАМІЧНА МОДЕЛЬ ДЕФОРМУВАННЯ ТА РУЙНУВАННЯ КОМПОЗИЦІЙНИХ МАТЕРІАЛІВ НА ОСНОВІ ДЕРЕВИНИ

**С.М. Кульман, кандидат технічних наук
ПП «Компанія Інтердизайн»**

Перехресний вплив ефекту термічного розширення та термопружного ефекту, у полі зовнішніх теплових та силових

© С.М. Кульман, 2013

навантажень, призводить до виникнення автоколиваний динамічної системи. Ортогональність функцій локальних внутрішніх напружень та локальних внутрішніх деформацій, є причиною збільшення амплітуд їх коливань. Що в свою чергу призводить до подвоєння частоти коливань локальної температури. Біфуркація динамічної системи, внаслідок подвоєння, переводить систему в область стійкого граничного циклу, аттрактора.

Композиційні матеріали, нелінійна динаміка, кінетика деформування та руйнування, довговічність, осцилятор, аттрактор, автоколивання

Постановка проблеми. Ефективність застосування нових композиційних матеріалів багато залежить від їх міцності та жорсткості при заданих режимах експлуатації, протягом усього терміну служби. Тому, розуміння процесу деформування та руйнування, є одним з найважливіших завдань матеріалознавства, а також важливою частиною завдань проектування виробів з цих матеріалів. Для досягнення прогресу в цій області, потрібно зрозуміти механізм утворення внутрішніх напружень та деформацій, їх взаємодію в системі, що знаходиться за певних зовнішніх умов [1].

Аналіз останніх досліджень. У роботах [2, 3] досліджено кінетику, а саме вплив нелінійних ефектів взаємодії внутрішніх факторів на тривалу міцність. Було виявлено, що саме присутність перехресних ефектів під час деформування призводить до накопичення локальних руйнувань, в кінцевому підсумку до глобального руйнування. Враховуючи, що зміни деформації залежать не тільки від зміни напружень, але і від зміни температури, закон Гука повинен бути представлений у вигляді рівнянь Дюгамеля-Неймана [1], (для простоти викладу залишимо тільки одну координату):

$$\varepsilon_x = \varepsilon_{\sigma_x} + \varepsilon_{T_x} = \frac{1}{E} (\sigma_x - \nu(\sigma_y + \sigma_z)) + \alpha(T - T_0) \quad (1)$$

Вирішуючи рівняння (1) щодо σ_x , та виключаючи, для спрощення, з розгляду ефект Пуассона, отримаємо:

$$\sigma_x = E\varepsilon_x + \alpha(T - T_0)E. \quad (2)$$

Рівняння (2) враховує суму напружень від зовнішніх навантажень (поверхневих сил) та від внутрішніх об'ємних сил, що пов'язані з термічним розширенням тіла.

Пружне навантаження викликає не тільки оборотні зміни розмірів та форми тіла, але й зміну характеристик внутрішньої атомно-молекулярної динаміки. Тут проявляється термопружний ефект (ефект Джоуля) – зміна температури пружних тіл, які мають адіабатичне навантаження. При одновісному навантаженні, зміна

температури ΔT тіла, що знаходиться при температурі T , визначається за формулою Кельвіна:

$$\Delta T = -\frac{\alpha T}{c} \sigma, \quad (3)$$

де σ – одноосне напруження, позитивне під час розтягування та негативне під час стиснення; α – коефіцієнт лінійного термічного розширення вздовж осі навантаження; C – теплоємність одиниці об'єму тіла.

При одновісному, пружному навантаженні питома робота, а отже, збільшення питомої внутрішньої енергії тіла наближено (без урахування ефекту Пуассона) складе:

$$\Delta W(\sigma) = \int_0^\sigma \sigma(\varepsilon) d\varepsilon, \quad (4)$$

де ε – відносно пружна деформація тіла.

З формули (3) випливає, що зміна величини питомої теплової енергії тіла під час навантаження складе:

$$\Delta Q(\sigma) = C \Delta T = -\alpha T \sigma. \quad (5)$$

Дослідження динаміки взаємодії температури та внутрішніх напружень під час деформування та руйнування композиційних матеріалів на основі деревини показали [3], що саме відставання зміни локальної температури у зоні руйнування від зміни локального внутрішнього напруження в цій зоні, призводить до періодичного виробництва ентропії, та в кінцевому підсумку до руйнування.

Тому, природно припустити, що швидкість зміни параметрів, що визначають стан тіла у даний момент часу, так само залежать від цих параметрів. Феноменологічна модель впливу перехресних ефектів під час деформування нагрітого тіла, під дією постійного зовнішнього навантаження, розглянута у вигляді термодинамічного осцилятора [3]:

$$\begin{aligned} \frac{d_i s}{dt} &= \sigma J_1 + T J_2; & J_1 &= L_1 \sigma + L_2 T; & J_2 &= L_2 \sigma + L_2 T; \\ \frac{dT}{dt} &= \sin \sigma; & \frac{d\sigma}{dt} &= \cos T. \end{aligned} \quad (6)$$

Показано, що перехресні ефекти всередині нагрітого тіла, що знаходиться під дією постійного навантаження є джерелами зсуву фаз між внутрішньою локальною температурою та локальним внутрішнім напруженням. Причому відставання зміни локальної температури у зоні локального напруженого стану від зміни локального внутрішнього напруження у цій зоні, призводить до періодичного виробництва ентропії, а отже до витрати внутрішньої енергії.

Мета досліджень. Деталізація моделі процесу деформування композиційних матеріалів на основі термодинамічного осцилятора методами системної динаміки.

Матеріали та методика досліджень. Феноменологічна модель (6) описує загальну, термодинамічну, картину деформування та руйнування. Тому для того, щоб отримати більш точну модель деформування ламіновану стружкової плити, розглянемо нагріте тіло під дією зовнішнього механічного навантаження у вигляді автономної неконсервативної динамічної системи.

Як відомо, математична модель динамічної системи вважається заданою, якщо введені параметри (координати) системи, які визначають однозначно її стан, та зазначений закон еволюції її стану у часі. У першому наближенні приймемо до уваги тільки пружні властивості матеріала що досліджується. Подальша деталізація моделі враховує її дисипативні властивості. Об'єкт, що досліджується допускає описати його стан наступними величинами X_1, X_2, \dots, X_N (у нашому випадку це T, σ, ε) у деякі моменти часу $t=t_0$. Величини X_i можуть набувати довільних значень, причому двом різним наборам величин X_{ii} і X'_i відповідають два різні стани. У цьому випадку закон еволюції динамічної системи у часі запишемо системою звичайних диференціальних рівнянь:

$$\frac{dX_i}{dt} = f_i(X_1, X_2, \dots, X_N), \quad i = 1, 2, \dots, N. \quad (7)$$

Результати досліджень. Динамічну систему, яку досліджували, можна розглядати або як об'єкт, у вигляді нагрітого тіла, що знаходиться під дією зовнішніх сил, або як процес деформування цього тіла під дією постійного зовнішнього навантаження у часі. Динамічну систему представили у вигляді системи диференціальних рівнянь:

$$\begin{cases} \frac{dT}{dt} = \alpha(T - T_0)\sigma - \frac{1}{2}(\sigma - \sigma_0)\varepsilon \\ \frac{d\sigma}{dt} = (\varepsilon - \varepsilon_0)E - \alpha(T - T_0)E - \delta \\ \frac{d\varepsilon}{dt} = \alpha(T - T_0) - (\sigma - \sigma_0)/E. \end{cases} \quad (8)$$

Приймемо в якості об'єкта дослідження ламіновану СП, виробництва ТОВ «Кроно-Україна». Заводські характеристики матеріалу: модуль пружності $E = 2600$ МПа, межа міцності на згин $[\sigma] = 14$ МПа, щільність 700 кг/м³, $\alpha = 0,00005$ К⁻¹. При початкових умовах: $t = t_0$; $T_0 = 300$ К; $\sigma_0 = 1$ МПа; $\varepsilon_0 = \sigma_0/E$. Відхилення від початкових умов у момент запуску системи враховує мікроскопічна флуктуаційна поправка $\delta = \sigma_0/1000000$.

Рішення системи (8) методом Рунге-Кутта четвертого порядку наведено на рис. 1 у вигляді фазових траєкторій у режимі безперервного часу, що дозволяє простежити еволюцію системи.

Аналіз результатів комп'ютерного моделювання, наведений на рис. 1 – 6, дозволяє виділити ряд особливостей її поведінки. Зокрема, динамічна система (8) описує процес коливання та періодичність зміни внутрішніх напружень, деформацій та температури.

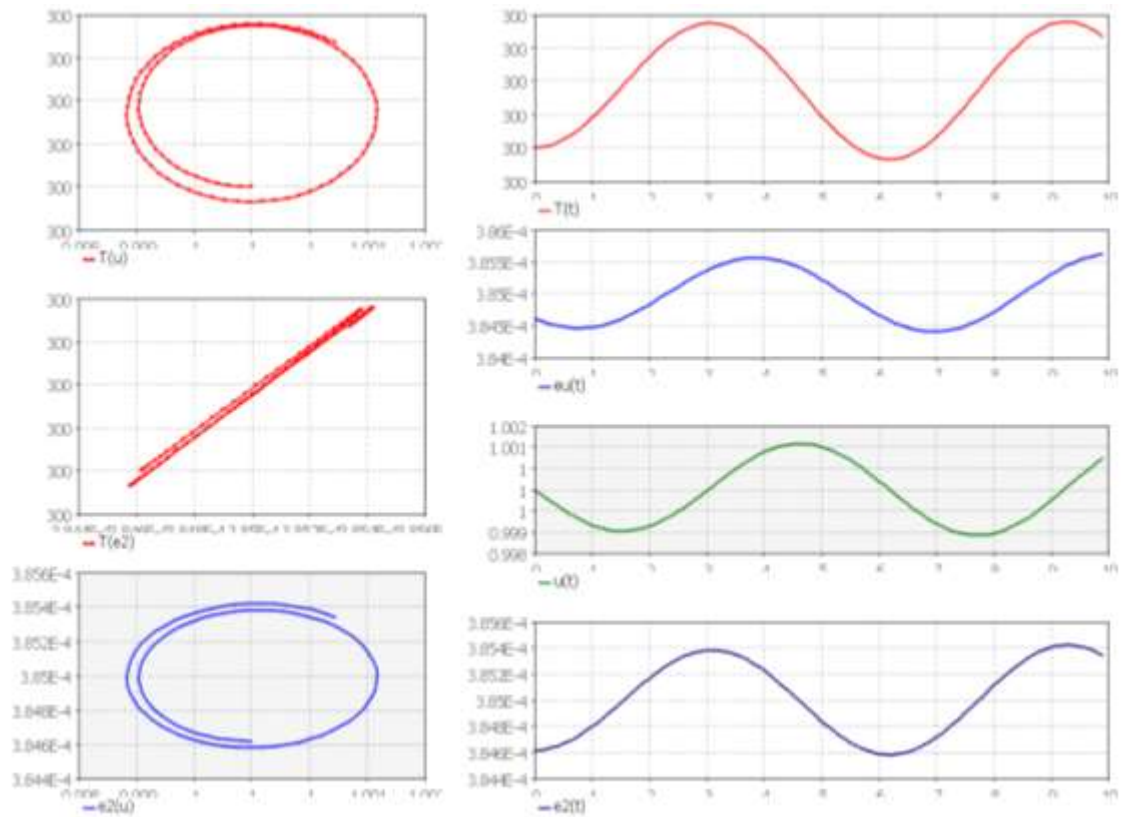


Рис. 1. Графіки внутрішніх напружень ($\sigma \equiv u$); деформації ($e2 \equiv \epsilon$); роботи деформування ($\epsilon\sigma \equiv e2u$); внутрішньої температури $T(u)$ в перші десять умовних одиниць часу, а також фазова діаграми залежності деформації ($e2 \equiv \epsilon$) та локальної температури $T(e2)$ у зоні деформування від внутрішнього напруження ($\sigma \equiv u$) в перші десять умовних одиниць часу.

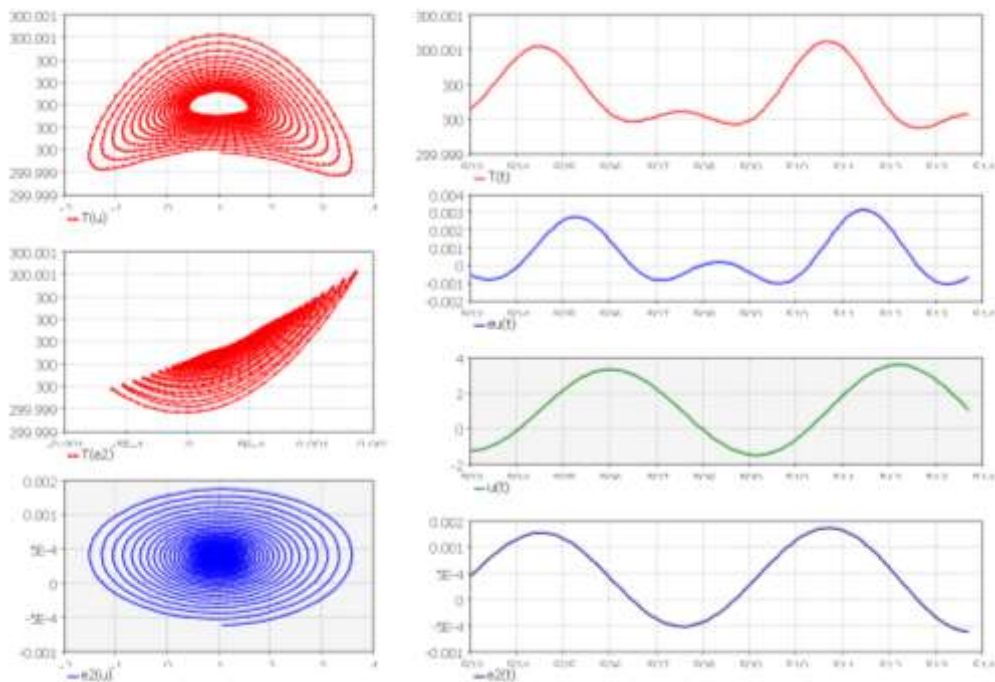


Рис. 2. Фазовий портрет динамічної системи через 515 умовних одиниць часу.

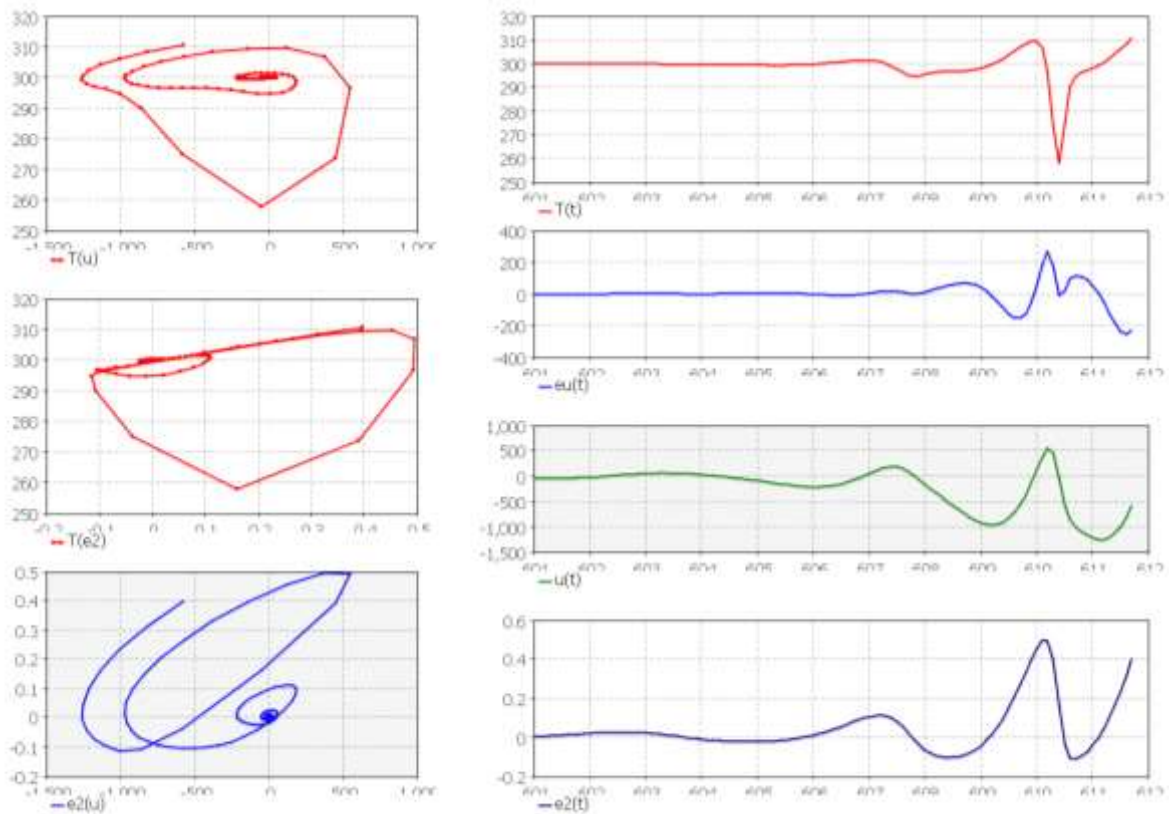


Рис. 3. Фазовий портрет динамічної системи через 613 умовних одиниць часу, в момент біфуркації.

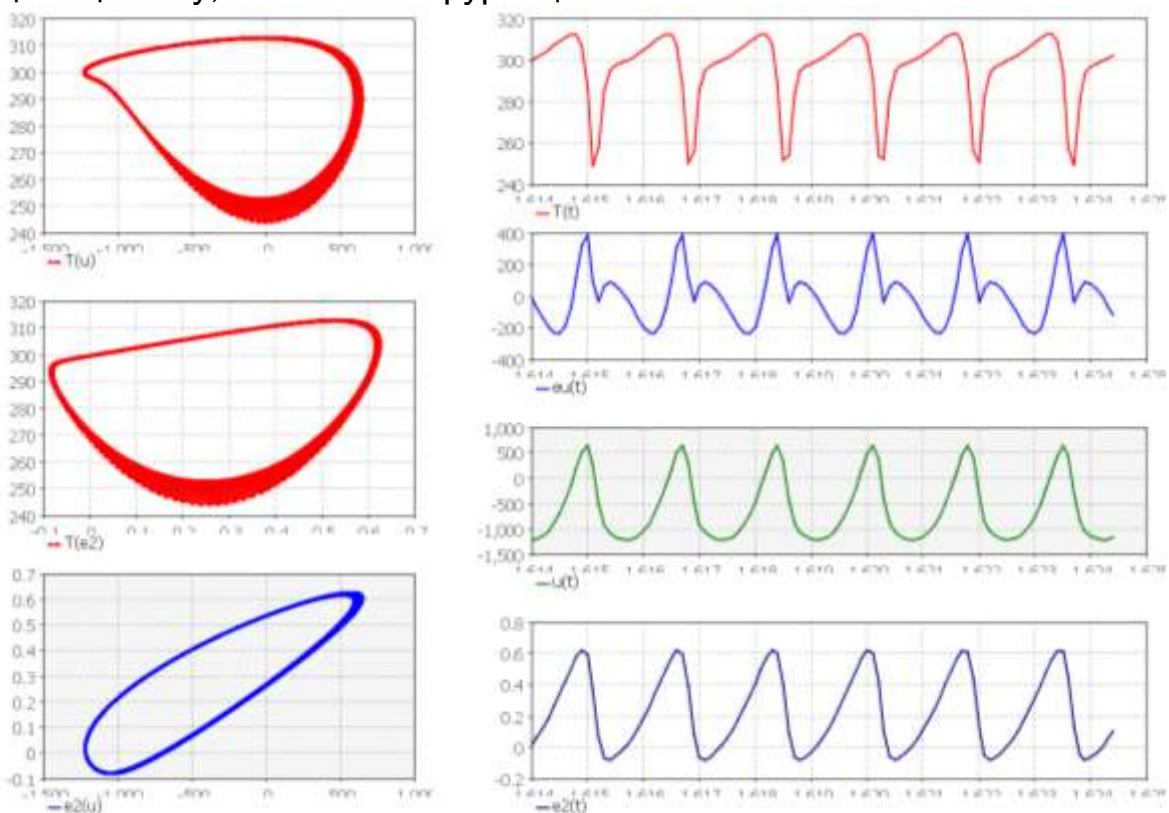


Рис. 4. Підсумковий портрет динамічної системи, у вигляді стійкого граничного циклу релаксаційних автоколивань, аттрактора.

Коливання всіх параметрів системи проходить з постійним збільшенням їх амплітуди. Діаграма роботи наведена на $e_2(u)$ показує постійні витрати внутрішньої енергії у процесі деформування. У початковий період, коливання всіх параметрів близькі до гармонійних. Динаміка процесу протікає з запізненням деформації та температури від напруження. Причому, частоти коливань усіх трьох параметрів системи рівні між собою. Зрушення фаз між напруженням та деформацією, а рівно, як і між температурою та напруженням, становить $\pi / 2$, що говорить про ортогональність цих функцій.

Енергетичні співвідношення динамічної системи (8) наведені у вигляді діаграми роботи $e_2(u)$ на рис. 2. Згідно цієї діаграми, енергія деформації збільшується за кожен цикл коливань. Абсолютна деформація так само збільшується на незначну величину при кожному наступному циклі.

Внутрішні локальні напруження динамічної системи поступово збільшуються, і в момент досягнення межі міцності матеріалу, система очевидно, повинна вважатися зруйнованою (рис. 3).

Динамічна система, що розглядається, проявляє всі ознаки автоколивної системи. У якій у результаті дії негативного зворотного зв'язку взаємодії σ та ε в першому рівнянні системи (8) виникає сила, що збігається по фазі зі швидкістю деформації, або випереджає деформацію на $\pi / 2$.

Аналіз еволюції динамічної системи свідчить про те, що у результаті поступового збільшення амплітуд σ та ε , при одночасному збереженні зсуву фаз між ними, робота деформації поступово подвоює частоту. Це призводить до подвоєння частоти коливань температури (рис. 2). Подальше підвищення амплітуд коливань параметрів системи веде до її біфуркації (рис. 3), та переходу в область стійкого граничного циклу, тобто аттрактора. При цьому надходження енергії ззовні системи рівняється її витрачанням всередині системи (рис. 4).

На початку еволюції системи форма коливань майже гармонійна, та частота коливань визначається в основному власною частотою коливання системи. У результаті біфуркації система переходить в область релаксаційних автоколивань, які є різко не синусоїдальними, та параметри системи змінюються стрибками.

Висновки

1. Перехресний вплив ефекту термічного розширення та ефекту термопружності, в полі зовнішніх теплових та силових навантажень, призводить до виникнення автоколивань динамічної системи, яка може бути визначена як термопружний осцилятор.

2. Ортогональність функцій локальних внутрішніх напружень та локальних внутрішніх деформацій, є причиною збільшення амплітуд

їх коливань. Що в свою чергу призводить до подвоєння частоти коливань локальної температури.

3. Біфуркація динамічної системи, внаслідок подвоєння частоти коливань температури, переводить систему в область стійкого граничного циклу, аттрактора.

Список літератури

1. Коваленко А.Д. Введение в термоупругость / А.Д. Коваленко. – К. : Наукова думка, 1965. – 204 с.
2. Кульман С.М. Нелінійні ефекти деформування і руйнування композиційних матеріалів на основі деревини / С.М. Кульман // Науковий вісник НУБіП України / Серія "Лісівництво та декоративне садівництво". – 2011. – Вип. 164, ч. 1. – С. 250 – 255.
3. Кульман С.М. Нелінійна динаміка деформування та руйнування композиційних матеріалів на основі деревини / С.М. Кульман // Науковий вісник НУБіП України / Серія "Лісівництво та декоративне садівництво". – 2012. – Вип. 171, ч. 2. – С. 200 – 207.
4. Кульман С.М. Кінетика тривалої міцності композиційних матеріалів на основі деревини / С.М. Кульман // Збірник наукових праць Подільського державного аграрно-технічного університету. Спеціальний випуск до VI науково-практичної конференції «Сучасні проблеми збалансованого природокористування». – Кам'янець-Подільський: ПДАТУ, 2011. – С. 196 – 206.

Перекрестное влияние эффекта термического расширения и термоупругого эффекта, в поле внешних тепловых и силовых нагрузок, приводит к возникновению автоколебаний динамической системы. Ортогональность функций локальных внутренних напряжений и локальных внутренних деформаций, является причиной увеличения амплитуд их колебаний. Что в свою очередь приводит к удвоению частоты колебаний локальной температуры. Бифуркация динамической системы, вследствие удвоения, переводит систему в область устойчивого предельного цикла, аттрактора.

Композиционные материалы, нелинейная динамика, долговечность, осциллятор, аттрактор, автоколебания.

Cross impact effect of thermal expansion and thermoelastic effect in the field of external heat and power loads, leads to oscillations of the dynamical system. Orthogonality of local internal stresses and local internal strain causes an increase of the amplitudes of the oscillations. Which in turn leads to a doubling of the frequency of the local temperature fluctuations. Bifurcation of the dynamical system, because the doubling system into the region of the stable limit cycle attractor.

Composite materials, nonlinear dynamics, durability, oscillator attractor oscillations.