

хисному покритті і його покращені антикорозійні властивості. Окрім цього, можна стверджувати, що захисні властивості покриттів КП 2, ПКП 3 і КП 4 є гіршими відносно КП 1 (але водночас кращими порівняно з вихідною епоксидною матрицею). Тому їх доцільно використовувати для підвищення експлуатаційних характеристик технологічного устаткування, яке експлуатують у звичайних умовах, позаяк показники їх фізико-механічних характеристик є досить високими.

Висновки. У роботі розроблено антикорозійні епоксикомпозитні покриття для захисту технологічного устаткування морського та річкового транспорту.

Встановлено, що найбільшим опором і найменшими показниками ємності характеризується захисне покриття на основі епоксидної матриці (100 мас.ч.) із вмістом добавок (модифікатор бензен-1,3-діамін – $q = 0,25$ мас.ч., ультрадисперсний алмаз – $q = 0,05$ мас.ч., карбонат літію – $q = 0,5$ мас.ч.). Доведено, що після витримки в агресивному середовищі морської води зразків впродовж $\tau = 30$ діб опір покриття становить $R = 23,0 \dots 23,5$ кОм·см², що у 2 рази перевищує опір епоксидної матриці. Після витримки покриття у середовищі морської води впродовж $\tau = 30$ діб показники його ємності становлять $C = 2200$ пФ/см², що у 2,1 раз менше, порівняно з ємністю епоксидної матриці. Тобто розроблене захисне покриття відрізняється поліпшеними антикорозійними властивостями.

Методом ІЧ-спектрального аналізу встановлено підвищений ступінь зшивання захисного покриття, характерною ознакою чого є зменшення відносної площі піків у діапазоні хвильових чисел $\nu = 400 \dots 4000$ см⁻¹. Методом оптичної мікроскопії встановлено термодинамічно і кінетично врівноважену структуру матеріалу, де відсутні дефекти структури у вигляді агломератів, мікро- та магістральних тріщин, що свідчить про високі показники його фізико-механічних властивостей.

Література

1. Килимник А.Б. Химическое сопротивление материалов и защита от коррозии : учебн. пособ. / А.Б. Килимник, И.В. Гладышева. – Тамбов : Изд-во ГТУ, 2008. – 80 с.
2. Розенфельд И.Л. Антикоррозионные грунтовки и ингибирование лакокрасочных покрытий / И.Л. Розенфельд, Ф.И. Рубинштейн. – М. : Изд-во "Химия", 1980. – 200 с.
3. Ліцов М. Застосування полімеризаційноздатних рідких систем і двошарових полімерних стрічок з активною поверхнею для протикорозійного захисту трубопроводів / М. Ліцов, А. Ліцов, О. Максимова // Фізико-хімічна механіка матеріалів : зб. наук.-техн. праць. – 2004. – Т. 1, № 4. – С. 396-400.
4. Сапронов О.О. Використання вrorинних енергоресурсів для підвищення адгезійних і фізико-механічних властивостей епоксидних композитів / О.О. Сапронов, Н.М. Букетова // Наукові нотатки : зб. наук.-техн. праць. – Луцьк : Вид-во ЛНТУ. – 2016. – С. – Вип. 53. – С. 154-161.
5. Сапронов О.О. Підвищення антикорозійних характеристик деталей судових енергетичних установок за рахунок використання епоксикомпозитних покриттів / О.О. Сапронов // Наукові нотатки : зб. наук.-техн. праць. – Луцьк : Вид-во ЛНТУ. – 2014. – Вип. 47. – С. 176-181.
6. Браїло М.В. Дослідження корозійної тривкості епоксикомпозитних покриттів з двокомпонентним наповнювачем для деталей судових енергетичних установок / М.В. Браїло, А.П. Бень, В.О. Скіренко, Г.В. Рудакова, О.В. Акімов // Науковий вісник НЛТУ України : зб. наук.-техн. праць. – Львів : РВВ НЛТУ України. – 2015. – Вип. 25.6. – С. 188-197.

Надійшла до редакції 19.09.2016 р.

Сапронов А.А., Букетов А.В., Лещенко А.В., Нигалатий В.Д. Антикоррозийные покрытия на основе эпоксидного связующего для защиты оборудования морского и речного транспорта

Исследована коррозионная стойкость разработанных эпоксидных композитных защитных покрытий, наполненных двухкомпонентным бидисперсным наполнителем. Методом ИК-спектрального анализа и оптической микроскопии исследована структура защитных покрытий, что дает возможность выбрать материалы для коррозионной защиты оборудования морского и речного транспорта. Дополнительно проведено исследование коррозионной стойкости материалов путем анализа изменения сопротивления и емкости со временем материалов в среде морской воды. Установлено, что модифицированное бензол-1,3-диамином защитное покрытие с содержанием двухкомпонентного наполнителя ультрадисперсного алмаза и карбоната лития характеризуется незначительным изменением сопротивления $\Delta R = 2$ кОм·см² в интервале всего времени исследования ($\tau = 30$ суток). Это свидетельствует о повышенных антикоррозионных свойствах разработанного покрытия.

Ключевые слова: эпоксидный композит, коррозия, ИК-спектральный анализ, сопротивление, емкость.

Sapronov A.A., Buketov A.V., Leshchenko A.V., Nigalatiy V.D. Anti-corrosion Coatings Based on Epoxy Binder to Protect the Equipment of Sea and River Transport

We have studied the corrosion resistance of the developed epoxy composite coatings, two-component filled bidisperse filler. By IR spectral analysis and optical microscopy we studied protective coatings structure that makes it possible to select the materials for corrosion protection of the equipment of sea and river transport. Additionally, in a study of corrosion resistance of materials by analyzing the changes in resistance and capacitance with time materials in seawater environment. It is found that the modified benzene-1,3-diamine protective coating containing a two-component filler ultrafine diamond and lithium carbonate is characterized by a slight change in resistance $\Delta R = 2$ kOhm·cm² whole study period interval ($\tau = 30$ days). This demonstrates the high anti-corrosion properties of the developed coating.

Keywords: epoxy composite, corrosion, IR-spectral analysis, resistance, capacitance.

УДК 534.1

НЕЛІНІЙНІ КОЛИВАННЯ СИСТЕМИ ГНУЧКЕ ТРУБЧАСТЕ ТІЛО-СУЦІЛЬНИЙ ПОТІК СЕРЕДОВИЩА, ЩО РУХАЄТЬСЯ ВЗДОВЖ НЬОГО

М.Б. Сокіл¹, І.І. Верхолд², Б.І. Сокіл³, О.І. Хитряк⁴

Досліджено динамічні процеси у трубчастому тілі, вздовж котрого рухається зі швидкістю суцільний потік однорідного середовища за умови, що трубчасте тіло взаємодіє із пружною основою. Побудовано математичну модель нелінійних коливань вказаної системи. Вона є нелінійним диференціальним рівнянням другого порядку з частинними похідними, що містить мішану похідну лінійної і часової змінних. Наявність останньої частково враховує рух суцільного середовища вздовж трубчастого тіла і з нею пов'язані основні труднощі під час побудови розв'язку математичної моделі. В основу досліджень покладено базові результати динаміки позовжньо-рухомих суцільних середовищ та узагальнення на їх базі асимптотичних методів нелінійної механіки. Зазначене, в сукупності, дало змогу отримати співвідношення, які описують основні пара-

¹ доц. М.Б. Сокіл, канд. техн. наук – НУ "Львівська політехніка"

² доц. І.І. Верхолд, канд. техн. наук – Національна академія сухопутних військ ім. гетьмана Петра Сагайдачного;

³ проф. Б.І. Сокіл, д-р техн. наук – Національна академія сухопутних військ ім. гетьмана Петра Сагайдачного;

⁴ доц. О.І. Хитряк, канд. техн. наук – Національна академія сухопутних військ ім. гетьмана Петра Сагайдачного

метри динамічного процесу системи трубчасте тіло-суцільне середовище залежно від фізико-механічних характеристик системи та швидкості руху суцільного середовища.

Ключові слова: трубчасте тіло, коливання, суцільний потік однорідного середовища, хвильове число, амплітуда, частота.

Вступ. Трубчасті тіла мають широке застосування у різних галузях машинобудування: для транспортування рідин, сипких середовищ. З їх допомогою забезпечується, зокрема, функціонування гідравлічних чи пневматичних приводів. Рух середовища вздовж трубчастого тіла впливає на динамічні навантаження останнього; у разі його взаємодії із зовнішніми тілами – на динамічні реакції, а в кінцевому результаті і на ресурс експлуатації систем транспортування. Урахування динаміки середовища вздовж гнучкого трубчастого тіла призводить до якісно нової математичної моделі динамічного процесу [1]. Для неї не вдається застосувати відомі класичні методи інтегрування крайових задач. Зважаючи на практичну значущість зазначеної задачі, у роботі зроблено спробу розробити методику дослідження впливу суцільного потоку середовища на коливання трубчастих тіл. Вона ґрунтується на поширенні основної ідеї дослідження динаміки одновимірних систем, які характеризуються сталою швидкістю позовжнього руху [2-4] та асимптотичних методах нелінійної механіки на нові класи задач. Зазначене дозволило отримати залежності, які описують основні параметри динамічного процесу досліджуваної системи залежно від фізико-механічних характеристик системи та кінематичних параметрів руху середовища.

Постановка задачі та математична модель динамічної системи трубчасте тіло-суцільний потік середовища, що рухається вздовж нього. За розрахункову модель об'єкта дослідження прийнято одновимірне гнучке тіло, що взаємодіє із пружною основою і вздовж нього рухається зі сталою швидкістю рівномірно розподілений потік середовища [1]. При цьому вважатимемо, що трубчасте тіло є гнучким (згинна жорсткість є малою величиною і нею нехтуємо). Маса тіла рівномірно розподілена вздовж довжини, а кінці – закріплені нерухомо. Величина сили натягу у трубчастому тілі є сталою; суцільне середовище повністю заповнює тіло і рухається вздовж нього зі сталою за величиною швидкістю.

Лінійну математичну модель досліджуваного об'єкта отримано в [1], однак лінійна модель значною мірою відображає спрощену картину динаміки процесу у зазначеній системі. Для точнішого описання його у роботі прийнято, що в процесі коливань досліджуваної системи максимальне значення нелінійних сил є малою величиною порівняно із максимальним значенням відновлювальної сили. Незважаючи на малину нелінійних сил, з часом ефект їх дії зростає і навіть за скінченний проміжок часу реальна картина, яка відповідає уточненій нелінійній моделі, буде значною мірою відрізнятися від спрощеної – лінійної. Отже, предметом розгляду роботи є нелінійне диференціальне рівняння вигляду

$$\frac{\partial^2 u(x,t)}{\partial t^2} + \frac{1}{m_c + m_m} \left(2m_c \frac{\partial^2 u(x,t)}{\partial x \partial t} V - \lambda^2 \frac{\partial^2 u(x,t)}{\partial x^2} + ku(x,t) \right) = \varepsilon f \left\{ u, \frac{\partial u(x,t)}{\partial x}, \frac{\partial u(x,t)}{\partial t} \right\},$$

$$\lambda = \sqrt{S - m_c V^2}, \quad (1)$$

де: $u(x,t)$ – відхилення від рівноважного положення поперечного перерізу трубчастого тіла із координатою x в довільний момент часу t ; m_m та m_c – відповідно маса одиниці довжини трубчастого тіла та суцільного середовища; V – швидкість руху суцільного середовища вздовж трубчастого тіла; S – сила поперечного натягу тіла; $\varepsilon f \left\{ u, \frac{\partial u(x,t)}{\partial x}, \frac{\partial u(x,t)}{\partial t} \right\}$ – нелінійна функція, яка враховує

всю множину реально існуючих нелінійних сил, параметр ε вказує на малу величину останніх. Беручи до уваги той факт, що кінці трубчастого тіла закріплені нерухомо, крайові умови для диференціального рівняння (1) набувають вигляду

$$u(x,t)|_{x=0} = u(x,t)|_{x=l} = 0. \quad (2)$$

Отже, дослідження динамічних процесів системи трубчасте тіло-суцільний потік рухомого середовища зв'язане із побудовою розв'язку крайової задачі (1), (2), що і є метою роботи.

Методика розв'язування. Для знаходження основних параметрів динаміки досліджуваної системи використаємо основну ідею хвильової теорії руху [2]. Відповідно до неї потрібно побудувати розв'язок відповідної незбуреної задачі, тобто рівняння

$$\frac{\partial^2 u(x,t)}{\partial t^2} + \frac{1}{m_c + m_m} \left(2m_c \frac{\partial^2 u(x,t)}{\partial x \partial t} V - \lambda^2 \frac{\partial^2 u(x,t)}{\partial x^2} + ku(x,t) \right) = 0 \quad (3)$$

за крайових умов (2). Як показано в [1], його одночастотний аналог має вигляд

$$u(x,t) = a \cos(\kappa x + \alpha t + \phi) + b \cos(\chi x - \alpha t + \psi), \quad (4)$$

$$\text{де } \kappa = \frac{n\pi}{l} + \frac{m_c V}{l\lambda} \sqrt{\frac{(n\pi)^2 \lambda^2 + kl^2(m_c + m_m)}{(m_c + m_m)\lambda^2 + (m_c V)^2}}, \quad \chi = \frac{n\pi}{l} - \frac{m_c V}{l\lambda} \sqrt{\frac{(n\pi)^2 \lambda^2 + kl^2(m_c + m_m)}{(m_c + m_m)\lambda^2 + (m_c V)^2}},$$

$$\omega = \frac{\lambda}{l} \sqrt{\frac{(n\pi)^2 \lambda^2 + kl^2(m_m + m_c)}{(m_c + m_m)\lambda^2 + (m_c V)^2}}. \quad (5)$$

Наведене дає змогу розв'язок збуреного рівняння (1), за вказаних крайових умов (2), подати у вигляді [3, 4]

$$u(x,t) = a(\cos(\kappa x + \alpha t + \phi) - \cos(\chi x - \alpha t - \phi)) + \varepsilon U(a, x, \phi), \quad (6)$$

де функція $U(a, x, \phi)$ – описує збурення руху, зумовлене нелінійними силовими чинниками. До того ж, вона задовольняє крайові умови, які випливають із (2), а параметри a та ϕ є змінними в часі величинами. Для знаходження співвідношень, які їх визначають, шляхом диференціювання (6) отримуємо

$$\frac{\partial u^2(x,t)}{\partial t^2} = -a\omega^2(\cos(\kappa x + \phi) - \cos(\chi x + \phi)) + 2\omega \frac{da}{dt}(\sin(\kappa x + \phi) + \sin(\chi x - \phi)) -$$

$$- \left(\frac{d^2 a}{dt^2} + 2\omega a \frac{d\phi}{dt} + a \left(\frac{d\phi}{dt} \right)^2 \right) (\cos(\kappa x + \phi) - \cos(\chi x + \phi)) +$$

$$+\varepsilon \left\{ \frac{\partial^2 U_1(a, x, \varphi)}{\partial a^2} \left(\frac{da}{dt} \right)^2 + \frac{\partial^2 U_1(a, x, \varphi)}{\partial \varphi^2} \left(\frac{d\varphi}{dt} \right)^2 + \frac{\partial^2 U_1(a, x, \varphi)}{\partial a \partial \varphi} \frac{da}{dt} \frac{d\varphi}{dt} + \right. \\ \left. \frac{\partial u^2(x, t)}{\partial x^2} = -a \left(k^2 \cos(kx + \varphi) - \cos(\chi x - \varphi) \right) + \varepsilon \frac{\partial^2 U_1(a, x, \varphi)}{\partial x^2} + \varepsilon^2 \dots \right. \quad (7)$$

Підставивши у рівняння (1) на місце функції $u(x, t)$ та її похідних залежності (6), (7), отримаємо рівняння, яке зв'язує параметри $\dot{a}$, $\dot{\varphi}$ та функцію $U(a, x, \varphi)$

$$\omega^2 \frac{\partial^2 U_1(a, x, \varphi)}{\partial \varphi^2} + \frac{1}{m_m + m_c} (2Vm_c \mu \frac{\partial^2 U_1(a, x, \varphi)}{\partial x \partial \varphi} - (S - m_m V^2) \frac{\partial^2 U_1(a, x, \varphi)}{\partial x^2}) = f_1(a, x, \varphi) - \\ - 2[\alpha_1 \sin(kx + \varphi) + \alpha_2 \sin(\chi x - \varphi)] \frac{da}{dt} - 2a[\alpha_1 \cos(kx + \varphi) - \alpha_2 \cos(\chi x - \varphi)] \frac{d\varphi}{dt}, \quad (8)$$

$$\text{де } \alpha_1 = \omega + \frac{2m_c V k}{m_m + m_c}, \alpha_2 = \omega - \frac{2m_c V \chi}{m_m + m_c}, \quad f_1(a, x, \varphi) = f(u, u_x, u_t) \begin{cases} u = a(\cos(kx + \varphi) - \cos(\chi x - \varphi)), \\ u_x = -a(k \sin(kx + \varphi) - \chi \sin(\chi x - \varphi)), \\ u_t = -a\omega(\sin(kx + \varphi) + \sin(\chi x - \varphi)). \end{cases}$$

Для однозначного визначення із диференціального рівняння (8) невідомих функцій $a(t)$ та $\varphi(t)$ накладемо додаткові умови на $U(a, x, \varphi)$, а саме – вона не повинна містити у своїх розвиненнях першої моди та її похідної. Наведене дає змогу отримати залежності, які описують основні параметри хвиль у вигляді

$$\frac{da}{dt} = \varepsilon \frac{\int_0^l \int_0^{2\pi} f_1(a, x, \varphi) [(\alpha_1 \sin kx + \alpha_2 \sin \chi x) \sin \varphi + (\alpha_1 \cos kx - \alpha_2 \cos \chi x) \cos \varphi] d\varphi dx}{2\pi l (\alpha_1^2 + \alpha_2^2)}, \\ \frac{d\varphi}{dt} = \omega + \varepsilon \frac{\int_0^l \int_0^{2\pi} f_1(a, x, \varphi) [(\alpha_1 \sin kx + \alpha_2 \sin \chi x) \sin \varphi - (\alpha_1 \cos kx - \alpha_2 \cos \chi x) \cos \varphi] d\varphi dx}{2\pi l (\alpha_1^2 + \alpha_2^2) a}. \quad (11)$$

Нижче, для випадку $\varepsilon f\{u, u_x, u_t\} = k_1 u^3 + k_2 u_t$, подано закони зміни амплітуди хвильового процесу за різних значень V та частоти коливань від швидкості при $S = 350H$, $\varepsilon = 0.1$, $m_c = 5\kappa z$, $m_m = 5\kappa z$, $l = 5m$, $k_1 = k_2 = 70$.

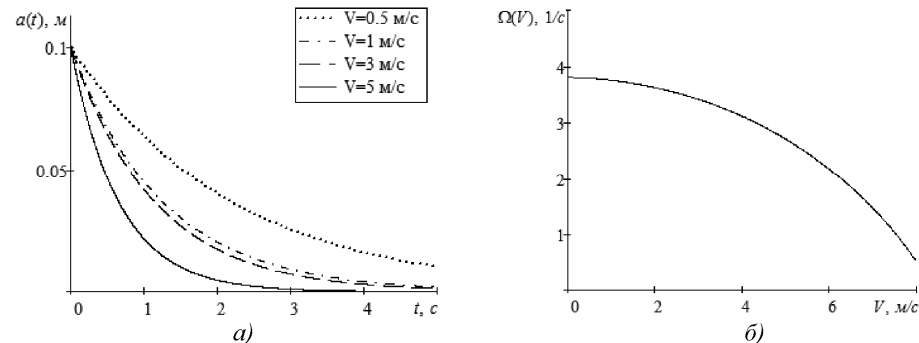


Рис. Залежності амплітуди коливань від часу за різних швидкостей руху суцільного середовища (а) та власної частоти від швидкості його руху (б)

Висновки та перспективи подальших досліджень. Розроблена у роботі методика дослідження коливних процесів трубчастого тіла, вздовж якого рухається суцільний потік середовища, дає змогу отримати у зручній для аналітичного дослідження формі залежності, які описують вплив всієї гами параметрів системи на основні характеристики динамічного процесу. Побудовані на їх основі графічні залежності показують: а) для більших значень швидкості відносного руху середовища та його погонної маси власна частота коливань системи є меншою; б) існує таке значення швидкості відносного руху середовища вздовж трубчастого тіла $V = \sqrt{S/m_c}$, за якого проходить зрів коливань системи;

в) за умови $\sqrt{\frac{(n\pi)^2 \lambda^2 + kl^2 (m_c + m_m)}{(m_c + m_m) \lambda^2 + (m_c V)^2}} > n\pi \frac{\lambda}{m_c V}$ відбувається явище самозахоплення відбитої хвилі (динамічний процес є накладанням двох хвиль, які поширюються в одному напрямку); г) для більших швидкостей руху суцільного середовища швидкість зникання амплітуди коливань системи є більшою. Викладені у роботі результати можуть слугувати базою для розв'язання складнішої задачі – дослідження впливу періодичного збурення на динамічний процес трубчастого тіла, вздовж котрого рухається зі сталою швидкістю суцільний потік середовища.

Література

1. Сокіл М.Б. Вплив суцільного середовища на коливання трубчастих тіл, які взаємодіють із пружною основою / М.Б. Сокіл, І.І. Верхола, О.І. Хитряк // Науковий вісник НЛТУ України : зб. наук.-техн. праць. – Львів : РВВ НЛТУ України. – 2016. – Вип. 26.1. – С. 377-381.
2. Сокіл М.Б. Згинні коливання гнучких елементів систем приводів і структура розв'язку їх математичних моделей / М.Б. Сокіл // Науковий вісник НЛТУ України : зб. наук.-техн. праць. – Львів : РВВ НЛТУ України. – 2012. – Вип. 22.1. – С. 144-147.
3. Хитряк О.І. Асимптотичний метод у дослідженні впливу періодичних сил на нелінійні коливання гнучких елементів приводу / О. Хитряк, М. Сокіл // Вісник Національного університету "Львівська політехніка". – Сер.: Динаміка, міцність та проектування машин і приладів. – Львів : Вид-во НУ "Львівська політехніка". – 2011. – Вип. 45. – С. 57-61.
4. Харченко Є.В. Вимушені коливання рухомих середовищ і асимптотичний метод у їх дослідженні / Є.В. Харченко, М.Б. Сокіл // Науковий вісник НЛТУ України : зб. наук.-техн. праць. – Львів : РВВ НЛТУ України. – 2006. – Вип. 16.1. – С. 134-139.

Надійшла до редакції 09.09.2016 р.

Сокил М.Б., Верхола І.І., Сокил М.Б., Хитряк О.І. Нелинейные колебания системы гибкое трубчатое тело-сплошной поток среды, которая движется вдоль него

Исследованы динамические процессы в трубчатом теле, вдоль которого движется с постоянной скоростью сплошной поток однородной среды при условии, что трубчатое тело взаимодействует с упругим основанием. Построена математическая модель нелинейных колебаний указанной системы. Она представляет собой нелинейное дифференциальное уравнение второго порядка в частных производных, что содержит смешанную производную линейной и временной переменных. Наличие последней частично учитывает движение сплошной среды вдоль трубчатого тела и с ней связаны основные трудности при построении решения математической модели. В основу исследований положены базовые результаты динамики продольно подвижных сплошных сред и обобщения на их базе асимптотических методов нелинейной механики. Отмеченное, в совокупности, дало возможность получить соотношения, которые описывают основные пара-

метры динамического процесса системы трубчатое тело-сплошная среда в зависимости от физико-механических характеристик системы и скорости движения сплошной среды.

Ключевые слова: трубчатое тело, колебание, сплошной поток однородной среды, волновое число, амплитуда, частота.

Sokil M.B., Verkhola I.I., Sokil B.I., Khytryak O.I. Nonlinear Vibrations of System Flexible Tubular Body-continuous Stream of Environment which moves along It

Dynamic processes in a tubular body along which the continuous stream of homogeneous environment moves with permanent speed on condition that a tubular body cooperates with resilient basis, are investigated. The mathematical model of nonlinear vibrations of the indicated system is built. It shows by itself nonlinear differential equalization of the second order with the derivatives of part, which contains the mixed derivative of linear and time variables. The presence of the last partly takes into account motion of continuous environment along a tubular body and to its basic difficulties are related at the construction of decision of mathematical model. In basis of researches the base results of dynamics of longitudinally mobile continuous environments and generalization on their base of asymptotic methods of nonlinear mechanics are fixed. In an aggregate the marked allowed to get correlations which describe the basic parameters of dynamic process of the system tubular body-continuous environment in dependence on physical-mechanical descriptions of the system and speed of movement of continuous environment.

Keywords: tubular body, vibration, continuous stream of homogeneous environment, wave-number, amplitude, frequency.

УДК 534.1

ВПЛИВ РУХОМОГО ВАНТАЖУ НА КОЛИВАННЯ ПОЗДОВЖНЬО-РУХОМОЇ СТРІЧКИ

О.І. Хитряк¹

Досліджено коливання гнучкої одновимірної стрічки, вздовж якої рухається, зі сталою за величиною швидкістю, деяка точкова маса. Побудовано математичну модель динаміки вказаної системи, яка описується диференціальним рівнянням із частинними похідними другого порядку та однорідними крайовими умовами. Особливістю зазначеного диференціального рівняння є те, що воно містить мішану похідну лінійної та часової змінних. Ця похідна враховує рух стрічки та точкової маси (вантаж) і з нею пов'язані основні труднощі побудови розв'язку диференціального рівняння руху.

Ключові слова: позовжньо-рухома стрічка, рухомий вантаж, мішана похідна, амплітуда, частота, методи збурень, хвильова теорія руху.

Вступ. Дослідження впливу рухомих вантажів на динаміку основи, по якій цей вантаж переміщується, є одним із важливих питань динаміки конструкцій [1]. Такі механічні системи трапляються у різних сферах інженерної діяльності та машинобудування. Прикладами структурних елементів, які призначені для підтримки рухомих тіл, є стрічки конвеєрних ліній чи транспортерів, мости, різного роду крани, канати, рейки, мостові та злітно-посадкові смуги, трубопроводи [2]. Вивчення перелічених механічних систем отримало особливу увагу в продовж останніх десятиліть [3-6]. Проте у зазначених працях дослідження проведено в основному із використанням чисельних методів.

¹ доц. О.І. Хитряк, канд. техн. наук – Національна академія сухопутних військ ім. гетьмана Петра Сагайдачного

Особливістю опису процесів із врахуванням рухомих вантажів, на відміну від статичних, є те що постійно змінюється точка їх контакту із несучою основою. Рух вантажу вздовж деякого тіла впливає на основні характеристики коливань останнього, а отже, і на динамічні зусилля та динамічні реакції (у разі взаємодії гнучкого тіла із зовнішніми об'єктами). Саме тому у низці праць досліджують проблему моделювання цього навантаження. Основними підходами до зазначеного моделювання є опис рухомого вантажу у вигляді рухомої сили, рухомої маси чи осцилятора [7].

Відомо, що для транспортування різних об'єктів широко використовують позовжньо-рухомі тіла. Їх математичними моделями є одновимірні позовжньо-рухомі одновимірні гнучкі елементи [8]. Врахування вказаного руху у поєднанні з рухомим осцилятором призводить до якісно нової математичної моделі динаміки системи "гнучка позовжньо-рухома стрічка – рухомий вантаж". Задачі такого типу у літературі розглянуто частково. У зв'язку з наявністю мішаної похідної у математичній моделі зазначеної системи для її дослідження, навіть за значних спрощень, не вдається застосувати відомі класичні методи інтегрування [9]. У цій роботі для вирішення поставленої задачі побудовано математичну модель, що описує коливальні процеси у механічній системі "гнучка позовжньо-рухома стрічка – рухомий вантаж" із врахуванням нелінійних силових чинників. Для її аналізу використано ідею описання коливального процесу позовжньо-рухомих одновимірних тіл, у вигляді накладання хвиль різних довжин [10, 11] та однакових частот. Зазначене у поєднанні із основними ідеями методів збурень [12] дало змогу визначити основні параметри динамічного процесу залежно від базових характеристик позовжньо-рухомого одновимірного тіла, його швидкості та властивостей рухомого вантажу.

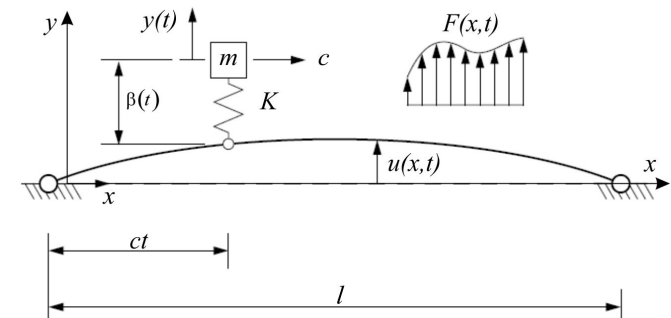


Рис. Розрахункова модель і розподіл сил, які діють на систему "гнучка позовжньо-рухома стрічка – рухомий вантаж"

Постановка задачі та методика розв'язування. Розглянемо стрічку довжиною l , що рухається у позовжньому напрямку із сталою швидкістю V і характеризується силою попереднього натягу T . По стрічці із відносною швидкістю c переміщується осцилятор (вантаж) із жорсткістю K масою m (рис.). Стрічка характеризується певними нелінійними силовими чинниками, а також на неї діє зовнішнє розподілене по довжині збурення. Вони описуються фун-