

Національний аерокосмічний університет
ім. М.Є. Жуковського “Харківський авіаційний інститут”

Мельтюхов Максим Вікторович

УДК 539.3

**МЕТОДИ ВИЗНАЧЕННЯ ВПЛИВУ
ТЕПЛОВОЇ І РАДІАЦІЙНОЇ ПОВЗУЧОСТІ
НА КОЛИВАННЯ ТА СТІЙКІСТЬ ЕЛЕМЕНТІВ КОНСТРУКЦІЙ**

01. 02. 04 - механіка деформівного твердого тіла

Автореферат

дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Харків 2003

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана в Національному технічному університеті “Харківський політехнічний інститут” Міністерства освіти і науки України.

Науковий керівник - доктор технічних наук, професор Морачковський Олег Костянтинович, завідувач кафедри теоретичної механіки Національного технічного університету “Харківський політехнічний інститут”.

Офіційні опоненти - доктор технічних наук, професор Фомічов Петро Олександрович, завідувач кафедри міцності літальних апаратів Національного аерокосмічного університету ім. М.Є. Жуковського “Харківський авіаційний інститут”;

кандидат технічних наук Чупринін Олександр Олексійович, доцент кафедри будівельної механіки Харківської державної академії міського господарства.

Провідна установа - Національний технічний університет України “Київський політехнічний інститут” Міністерства освіти і науки України, м. Київ, кафедра динаміки, міцності машин та опору матеріалів.

Захист відбудеться 25.04. 2003 р. о 14 годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 64.062.04 в Національному аерокосмічному університеті ім. М.Є. Жуковського “Харківський авіаційний інститут” за адресою: м. Харків, вул. Чкалова 17.

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Національного аерокосмічного університету ім. М.Є. Жуковського “Харківський авіаційний інститут”.

Автореферат розісланий 21.03.2003 р.

Вчений секретар спеціалізованої вченої ради.

Професор

Г.Л. Корнілов

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

У багатьох областях машинобудування, таких як турбобудування, авіація, ракетно-космічне машинобудування, ядерна енергетика й інші, конструкції при експлуатації піддані дії високих температур, статичних і динамічних навантажень. Елементи конструкцій у цих умовах деформуються при повзучості, що супроводжується накопиченням незворотних деформацій і пошкоджень, зниженням міцності.

Для задоволення підвищених вимог, щодо виробів відповідальної техніки, багатьма вченими в Україні та в інших країнах світу активно розробляються й удосконалюються методи для достовірного аналізу тривалої міцності конструкцій, що експлуатуються при повзучості. Найбільш актуальними в цьому напрямку механіки є проблеми прогнозування властивостей тривалої міцності матеріалів і конструкцій. Поряд з цим, не менш важливими є оцінки відклику конструкцій на можливі за умов експлуатації різні види збурення основного стану при повзучості. Дотепер ця проблема не отримала свого рішення, практично є відсутніми методи і результати систематичних досліджень з прогнозування змін внаслідок повзучості важливих властивостей конструкцій, зокрема, власних частот і критичних сил втрати стійкості тонкостінних елементів конструкцій.

Актуальність теми. Роботу присвячено розробці методів для визначення впливу теплової і радіаційної повзучості на коливання та стійкість елементів тонкостінних конструкцій, що дозволить виконувати дослідження і отримувати необхідні оцінки відклику конструкцій на можливі за умов експлуатації збурення їхнього основного стану при повзучості. Високі сучасні вимоги і практичні потреби у визначенні змін важливих властивостей енергетичної і ядерної техніки, що експлуатується при теплової і радіаційній повзучості, відсутність у механіці деформівного твердого тіла методів і систематичних досліджень по темі дисертаційної роботи визначають її актуальність як у науковому, так і прикладному відношенні.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Робота виконана в Харківському Національному технічному університеті “Харківський політехнічний інститут” в рамках координованої Міністерством освіти і науки України фундаментальної науково-дослідної держбюджетної теми: “Створення теорії та методів розрахунку тонкостінних конструкцій з ізотропних та ортотропних матеріалів, що пошкоджуються при повзучості” (№ Д.Р. 0100U001650).

Мета і задачі дисертаційної роботи включають: розробку методів для визначення впливу теплової і радіаційної повзучості на коливання та стійкість елементів конструкцій при малих відхиленнях від основного стану і їхнього використання в дослідженнях елементів конструкцій, розрахункові схеми яких відповідають уточненим моделям повзучості стержнів.

У роботі поставлені і вирішені такі основні задачі:

1. Дана загальна математична постановка задачі теплової і радіаційної повзучості просторових

тіл при статичному і швидко осцилюючому навантаженні в “основному” стані і сформульовані задачі про деформування тіл при змушеному відхиленні в “малому” від основного стану.

2. Запропоновані методи визначення впливу повзучості на коливання і стійкість елементів конструкцій на основі спільного розв’язання початково-крайових задач повзучості тіл в “основному” стані і задач про коливання і стійкість тіл при змушеному відхиленні в “малому” від основного стану.
3. Створені програмні розробки для чисельних досліджень впливу теплової і радіаційної повзучості на коливання і стійкість елементів конструкцій, розрахункові схеми яких відповідають уточненим моделям повзучості стержнів.
4. Для обґрунтування вірогідності запропонованих моделей і методів розрахунків вирішені тестові приклади, для яких отримані наближені рішення і приведені їхні порівняння з відомими в літературі аналітичними, чисельними й експериментальними даними.
5. Установлені нові закономірності впливу теплової і радіаційної повзучості при статичному і швидко циклічному навантаженні на коливання і стійкість стержневих елементів конструкцій.
6. Виконані розрахунки металокерамічних контейнерів-упаковок, призначених для транспортування і поховання твердих радіоактивних відходів.

Об'єктом досліджень у роботі є деформівні в умовах теплової і радіаційної повзучості тіла і елементи конструкцій: робочі лопатки газотурбінних двигунів, контейнери для захоронення радіоактивних відходів.

Предметом дослідження дисертації є механічні процеси теплової, радіаційної повзучості і пошкодження у тілах та їхній вплив на коливання і стійкість при відхиленні в “малому” від основного стану при статичному і швидко змінюваному циклічному навантаженні.

Методи дослідження містять теоретичні методи континуальної механіки і теорії повзучості, математичні методи опису деформування тіл і елементів тонкостінних конструкцій при повзучості, коливаннях і стійкості, а також чисельні методи розрахунків на повзучість за схемою методу скінченних елементів (МСЕ) у сполученні з кроковим методом Рунге-Кутта-Мерсона, методи Гауса, Холецького і Якобі для побудови та розв’язання систем алгебраїчних рівнянь МСЕ, визначення власних значень матриць.

Наукова новизна одержаних результатів полягає в наступному:

- надано розвиток методів розрахунку на повзучість і тривалу міцність елементів конструкцій за рахунок створення нового методу для визначення впливу теплової і радіаційної повзучості на коливання і стійкість конструкцій при змушеному відхиленні в “малому” від основного стану;
- створені програмні розробки для визначення впливу теплової і радіаційної повзучості на коливання і стійкість тонкостінних елементів конструкцій, розрахункові схеми яких відповідають

уточненим стержневим моделям;

- уперше визначені якісні і кількісні закономірності впливу терморадіаційної і динамічної повзучості стержневих елементів конструкцій та встановлені зміни в їхньому спектрі частот і межі критичних сил втрати стійкості;
- отримані практично важливі оцінки безпеки транспортування і збереження металокерамічних контейнерів-упаковок з радіоактивними відходами, які проектуються у Національному науковому центрі “Харківський фізико-технічний інститут” (ННЦ “ХФТІ”).

Практичне значення одержаних результатів. Запропоновані в роботі методи щодо визначення впливу теплової і радіаційної повзучості на коливання та стійкість елементів тонкостінних конструкцій можна використовувати в наукових і прикладних дослідженнях, при проектуванні відповідальної авіаційної, космічної і реакторної техніки. Результати роботи використані в Національному технічному університеті “Харківський політехнічний інститут” (НТУ “ХПІ”) при виконанні держбюджетної науково-дослідної теми, яка координувана Міністерством освіти і науки України, у навчальному процесі при підготовці випускних робіт бакалаврів і магістрів на кафедрі теоретичної механіки. Розробки по темі роботи у виді результатів досліджень, практичних рекомендацій і висновків використані в Інституті Фізики Твердого Тіла, Матеріалознавства і Технології, ННЦ “ХФТІ” при проектуванні довгомірних металокерамічних контейнерів-упаковок з твердими радіоактивними матеріалами, що підтверджено актом в додатку до дисертації.

Особистий внесок здобувача. Усі результати дисертаційної роботи отримані особисто автором. В опублікованих статтях зі співавторами [1, 5 - 7] автору належать: результати розрахунків із визначенням впливу пошкодження при транспортуванні металокерамічних контейнерів-упаковок на їхню міцність в умовах захоронення [1], математичні моделі вібраційної повзучості гнучких елементів тонкостінних конструкцій з урахуванням деформацій зсуву [5], метод, алгоритм і програмна реалізація чисельного аналізу щодо впливу повзучості на власні частоти і стійкість стержневих елементів конструкцій [6], уточнені стержневі моделі повзучості конструкцій та розрахунки для них [7].

Апробація результатів дисертації. Основні результати дисертаційної роботи обговорені на наукових конференціях: Міжнародний симпозіум по механіці руйнування матеріалів і конструкцій, Польща, Белосток, Августово; на 2-й, 3-й, 4-й Міжнародних науково-технічних конференціях "Фізичні і комп'ютерні технології в народному господарстві", Харків; на Міжнародній науково-практичній конференції МісгоCAD - 2001 "Наука і соціальні проблеми суспільства: людина, техніка, технологія, навколишнє середовище", Харків; на XV міжнародній конференції по фізиці радіаційних явищ і радіаційному матеріалознавству (Алушта, 2002 р.); на семінарах кафедри теоретичної механіки НТУ “ХПІ” у 1999-2002 р.; на науково-технічній раді Інституту фізики твердого тіла, матеріалознавства і технології ННЦ “ХФТІ” в 2002 р.

Публікації. Результати дисертації опубліковані у 7 роботах, з яких 3 статті містяться в журналах, оговорених у переліку ВАК України, 3 статті і тези доповіді - в матеріалах Міжнародних науково-технічних конференцій.

Структура та обсяг дисертації. Робота складається з вступу, п'яти розділів, висновку, списку використаних джерел з 118 найменувань (на 11 сторінках), 49 рисунків, п'яти таблиць, п'яти додатків. Загальний обсяг роботи - 134 сторінки.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі наведено стан наукової проблеми зі створення методів розрахунків на повзучість і тривалу міцність, а також основні положення підходу до визначення впливу повзучості на важливі властивості коливальних та стійкості конструкцій при статичному й циклічному навантаженні. Обґрунтована актуальність теми дисертаційної роботи, сформульовано мету роботи й задачі дослідження, наведено зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Охарактеризовано наукову новизну та практичну цінність одержаних результатів. Наведені дані про особистий внесок здобувача в опублікованих роботах та апробацію результатів роботи.

У першому розділі подано огляд літературних джерел. Надано оцінку стану проблеми повзучості деформованих тіл і стисло класифіковані основні етапи розвитку теорії повзучості і тривалої міцності матеріалів і конструкцій. Відзначено роботи Арутюняна Н.Х., Бойла Дж., Бейлі Р., Бурлакова А.В., Голуба В.П., Іллюшина О.О., Качанова Л.М., Локощенко А.М., Львова Г.І., Малініна М.М., Мерзлякова В.А., Морачковського О.К., Писаренко Г.С., Підгорного А.М., Пошивалова В.П., Работнова Ю.М., Романова К.В., Савченко В.Г., Стрижало В.О., Шевченко Ю.М., Шестерікова С.А. і багатьох інших.

Розглянуті різні теорії поперечного зсуву, що опубліковані в літературі і використані в дослідженнях поперечного згину, коливальних та стійкості тонкостінних конструкцій при пружному деформуванні. Наведені моделі теплової, радіаційної та динамічної повзучості матеріалів і конструкцій. Розглянуто публікації з проблем стійкості пружного зрівноваженого стану конструкцій та окремих конструктивних елементів, а також окремі дослідження щодо впливу повзучості на стійкість елементів конструкцій. В цьому напрямку відзначені фундаментальні результати, які одержані в роботах Алфутова М.А., Біргера І.О., Вольміра А.С., Григолюка Е.І., Гудрамовича В.С., Кантора Б.Я., Коломака В.Д., Куршина Л.М., Пошивалова В.П. та деяких інших. Зроблено висновок, що більшу кількість досліджень присвячено вивченню впливу повзучості на стійкість елементів конструкцій внаслідок розвитку початкових недосконалостей, та практично відсутні систематичні дослідження впливу повзучості на динамічні властивості та межі стійкості зрівноваженого

основного стану елементів конструкцій.

На підставі оцінки сучасного стану проблеми по темі дисертації сформульовані ціль та основні задачі роботи, а також визначені методи, які є ефективними для розв'язання названих задач.

У другому розділі розглянуто загальну постановку проблеми, що досліджено в роботі. Об'єктом вивчення є просторові тіла, що закріпленні на поверхні S_1 , навантажені поверхневими силами p_i^0 , які прикладені на поверхні S_2 , із зовнішньою нормаллю $\vec{n}(n_i)$ і об'ємними силами g_i^0 . У довільний момент часу розглянуті: "основний" зрівноважений стан тіла, який повільно змінюється у часі внаслідок повзучості, і "суміжний" додатковий стан, який є викликаним силовим або кінематичним збуренням. В тексті роботи параметри основного і додаткового стану позначені верхніми індексами "0", "*". Відгук системи на миттєве збурення і параметри додаткового стану вважаються "малими" у порівнянні з відповідними параметрами основного стану. Для актуальних компонент вектору переміщень та тензору напруження, прийнято, що

$$u_i = u_i^0 + u_i^*, \quad \sigma_{ij} = \sigma_{ij}^0 + \sigma_{ij}^*. \quad (1)$$

В означеннях, що зазвичай приймаються, загальну систему рівнянь для визначення основного стану прийнято наступною:

$$\begin{aligned} \sigma_{ij,j}^0 + g_i^0 &= 0, \quad \sigma_{ij}^0 n_j = p_i^0, \quad \forall x \in S_2, \\ \varepsilon_{ij}^0 &= (u_{i,j}^0 + u_{j,i}^0 + \underline{u_{k,i}^0 u_{k,j}^0}) / 2, \\ \varepsilon_{ij}^0 &= C_{ijkl} \sigma_{kl}^0 + \alpha_{ij} \Delta T^0 + c_{ij}^0, \\ c_{ij}^0(x,0) &= 0, \quad u_i^0 = \tilde{u}_i^0, \quad \forall x \in S_1. \end{aligned} \quad (2)$$

У системі (2), нелінійні фізичні рівняння записані у припущенні про підсумовування термомпружних деформацій та деформацій повзучості, тензор пружності - C_{ijkl} , тензор коефіцієнтів температурного розширення - α_{ij} .

У довільний момент часу, коли деформації повзучості відомі, параметри основного стану визначені за умови стаціонарності функціонала Лагранжу:

$$\int_V \delta \left(c^0 - \varepsilon^T \sigma^0 - \delta u^0 \cdot g^0 \right) dV - \int_S \delta u^0 \cdot p^0 dS = 0, \quad (3)$$

де $\{u^0\}$ - вектор переміщень точок тіла в основному стані.

У рівності (3), вектор $\{c^0\}$, що складається з компонент тензору незворотних деформацій повзучості у розглянутий момент часу, вважається попередньо визначеним. Для цього розглянуто покрокове інтегрування у часі рівнянь стану повзучості, що складають систему кінетичних рівнянь та ураховують зміну різних процесів, які супроводжують повзучість, наприклад, пошкоджуваність - d^0 . В означеннях, що зазвичай приймаються, ці рівняння мають вигляд:

$$\dot{c}_{ij}^0 = \frac{3}{2} \frac{\dot{c}_e^0}{\sigma_e^0} (\sigma_{ij}^0 - \sigma_0^0 \delta_{ij}), \quad \dot{d}^0 = \dot{d}(\sigma^0, d^0; T), \quad (4)$$

$$d^0(0) = c_{ij}^0(0) = 0, \quad d^0(t_*) = d_*^0,$$

де \dot{c}_e^0 , σ_e^0 , d_*^0 , t_* - еквівалентні величини швидкості деформацій повзучості та напруження, значення параметра пошкодження та час завершення прихованого руйнування.

Для динамічної повзучості, що спостерігається при швидких циклічно-змінюваних напруженнях ($\Omega > 1 \dots 3$, Гц), ці рівняння прийняті відповідно до тих, що запропоновані в роботах Морачковського та Бреславського:

$$\dot{c}_e^0 = \Lambda \left[\frac{\sigma_e^0}{1-d^0} \right] F(A); \quad \dot{d}^0 = Q \left[\frac{\sigma_e^0}{1-d^0} \right] K(A); \quad (5)$$

$$A = \frac{\sigma_e^{a0}}{\sigma_e^0}, \quad H(A) = \int_0^1 F(\xi) + A \Phi(\xi) d\xi, \quad K(A) = \int_0^1 Q(\xi) + A \Phi(\xi) d\xi,$$

де A - параметр асиметрії циклу напружень, σ_e^{a0} - еквівалентні амплітудні напруження, Λ , F , Q - функції, що встановлюють за даними опитів із зразками матеріалу в умовах динамічної повзучості при сумісній дії статичних та циклічно-змінюваних у часі напружень $\sigma = \sigma^0 (1 + A \Phi(\xi))$.

При статичній повзучості ($A = 0$), з рівнянь стану (5) виходять відомі рівняння Работнова-Качанова.

Для радіаційної повзучості, нелінійні фізичні рівняння у системі (2) записані у припущенні про підсумовування термопружних деформацій з деформаціями теплової, радіаційної повзучості та радіаційного пухнення, які є відповідними до накопиченого у часі флюенсу нейтронного потоку - Ψ :

$$\varepsilon_{ij}^0 = C_{ijkl} \sigma_{kl}^0 + \alpha_{ij} \Delta T^0 + c_{ij}^0 + c_{ij}^{R0} + \theta_{ij}^{R0}, \quad (6)$$

$$\dot{c}_{ij}^{R0} = \frac{3}{2} \frac{\dot{c}_e^{R0}}{\sigma_e^0} (\sigma_{ij}^0 - \sigma_0^0 \delta_{ij}), \quad \dot{c}_e^{R0} = B_R \frac{\sigma_e^0 \bar{n}_R}{1-d^0 \bar{k}_R}, \quad \theta_{ij}^{R0} = \frac{1}{3} \theta^{R0} \delta_{ij},$$

де \dot{c}_e^{R0} , σ_e^0 - еквівалентні величини швидкості деформацій радіаційної повзучості та напруження, $B_R = B_R(\Psi, T)$, $\theta^{R0} = \theta^{R0}(\Psi, t; T)$ - функції, що встановлюються за даними опитів по радіаційній повзучості при певному законі нейтронного опромінення: $\dot{\Psi} = \dot{\Psi}(\Psi, t)$.

Для миттєвого збурення в "малому" від основного стану, додатковий стан описується геометричними співвідношеннями, що отримано за умов лінеаризації біля основного стану вихідних нелінійних рівнянь та законом пружності:

$$\varepsilon_{ij}^* = \varepsilon_{ij}^{0*} + \varepsilon_{ij}^{**}, \quad \varepsilon_{ij}^* = C_{ijkl} \sigma_{kl}^*, \quad (7)$$

$$\varepsilon_i^{0*} = \frac{\partial u_i^*}{\partial x_i} + \frac{\partial u_1^0}{\partial x_i} \frac{\partial u_1^*}{\partial x_i} + \frac{\partial u_2^0}{\partial x_i} \frac{\partial u_2^*}{\partial x_i} + \frac{\partial u_3^0}{\partial x_i} \frac{\partial u_3^*}{\partial x_i}, \quad i=1, 2, 3,$$

$$2\varepsilon_{ij}^{0*} = \frac{\partial u_i^*}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j^*}{\partial x_i} + \frac{\partial u_1^0}{\partial x_i} \frac{\partial u_1^*}{\partial x_j} + \frac{\partial u_2^0}{\partial x_i} \frac{\partial u_2^*}{\partial x_j} + \frac{\partial u_3^0}{\partial x_i} \frac{\partial u_3^*}{\partial x_j} +$$

$$+ \frac{\partial u_1^0}{\partial x_j} \frac{\partial u_1^*}{\partial x_i} + \frac{\partial u_2^0}{\partial x_j} \frac{\partial u_2^*}{\partial x_i} + \frac{\partial u_3^0}{\partial x_j} \frac{\partial u_3^*}{\partial x_i}, \quad i \neq j, \quad i, j = 1, 2, 3.$$

Коли розглядають основний стан при повзучості, переміщення за часом до самого моменту прихованого руйнування, навіть при малих деформаціях, набувають скінченних величин, а тому є обгрунтованим збереження у (7) додатків, що залежать від основного стану та містять переміщення, позначені індексом "0". У дослідженнях пружних коливань та стійкості конструкцій з попередньо зрівноваженим напруженим станом, зазвичай припускають їхню малість і нехтують цими додатками.

Для збурення, що відповідає усталеним вимушеним гармонійним коливанням тіла з частотою Ω , амплітудні переміщення додаткового стану визначаються за умов стаціонарності функціонала Лагранжу:

$$\int_V \left(\delta \varepsilon^{0*T} \sigma^* + \delta \varepsilon^{**T} \sigma^0 - \rho \Omega^2 \delta u^{*T} u^* + g^* \right) dV - \int_S \delta u^{*T} p^* dS = 0. \quad (8)$$

У додатковому стані, що за збуренням відповідає вільним коливанням, функції форм переміщень і власні частоти визначаються за умов мінімуму функціонала Лагранжу:

$$\int_V \left(\delta \varepsilon^{0*T} \sigma^* + \delta \varepsilon^{**T} \sigma^0 - \rho \omega^2 \delta u^{*T} u^* \right) dV = 0, \quad (9)$$

де ω - частота коливань.

Динамічному критерію втраті стійкості основного зрівноваженого стану у деякий момент часу відповідає розв'язок рівняння (9) при $\omega=0$. Для визначення межі критичних сил стійкості основного зрівноваженого стану, в роботі розглядалось збурення у виді пропорційного довантаження тіла у деякий момент часу напруженням $\alpha \{ \sigma_0 \}$, а критичну величину - α_{\min} встановлено за умови стаціонарності функціонала Лагранжу:

$$\int_V \left(\delta \varepsilon^{0*T} \sigma^* + \delta \varepsilon^{**T} \sigma^0 + \alpha \sigma_0 \right) dV = 0. \quad (10)$$

Таким чином, додатковий напружено-деформований стан, в залежності від виду збурення, визначається шляхом розв'язання варіаційних рівностей (8)-(10), до яких входять вектори напруження - $\{ \sigma^0 \}$ та деформацій - $\{ \varepsilon^{0*} \}$ основного стану. Вони визначаються при розв'язанні початко-

во-крайової задачі повзучості тіла. Для розв'язання відповідних варіаційних рівностей, в розділі розглянуто метод скінченних елементів (МСЕ) із застосуванням узгодженої СЕ-сітки.

У цьому розділі, для визначення параметрів основного стану на кроці шагу у часі одержано систему рівнянь МСЕ:

$$\underline{K}^0 \underline{q}^0 = \underline{P}^0 + \underline{R}^{0T} + \underline{R}^{0C}, \quad (11)$$

де \underline{q}^0 , \underline{K}^0 - глобальні вектор узагальнених координат і матриця жорсткості СЕ моделі тіла, \underline{P}^0 , \underline{R}^{0T} , \underline{R}^{0C} - вектори зовнішніх сил та фіктивних сил, які відповідають температурному полю і незворотнім деформаціям повзучості основного стану та є приведеними до вузлів СЕ-сітки тіла.

Наприкінці розділу побудовані рівняння МСЕ для визначення додаткового стану, відповідно до виду збурення. Так, для усталених вимушених коливань при збуренні циклічно змінюваними з частотою Ω силами, амплітудні значення вузлових переміщень визначались розв'язанням рівнянь:

$$\underline{K}^* + \underline{S}^* - \Omega^2 \underline{M}^* \underline{q}^* = \underline{P}^*, \quad (12)$$

де \underline{K}^* , \underline{S}^* - глобальні матриці жорсткості та "початкових" напружень, елементи яких визначаються по даним про зрівноважений напружено-деформівний стан тіла при повзучості на момент збурення, \underline{P}^* - вектор амплітудних значень зовнішніх сил в вузлах СЕ-моделі тіла, \underline{M}^* - матриця мас.

Для вільних коливань при кінематичному збуренні тіла, частотний спектр та форми вузлових переміщень визначались розв'язанням рівнянь:

$$\underline{K}^* + \underline{S}^* - \omega^2 \underline{M}^* \underline{q}^* = 0 \quad (13)$$

Для визначення межі критичних сил стійкості основного зрівноваженого стану при збуренні у виді пропорційного довантаження тіла, критичну величину коефіцієнта пропорційності визначено методом пошуку кореня рівняння:

$$\alpha_{kp} = \min |\alpha| \det [\underline{K}^* + \underline{S}^* + \alpha \underline{S}_0] = 0. \quad (14)$$

У рівняннях (12) – (14) елементи матриць \underline{K}^* , \underline{S}^* визначаються за змінними у часі внаслідок повзучості параметрами основного зрівноваженого стану конструкцій, що тривалий час упритул до руйнування експлуатуються в умовах повзучості. Ці параметри попередньо можна визначити за даними розв'язання системи рівнянь (11).

У третьому розділі розглянуто конкретизацію рівнянь, що отримано у попередньому розділі стосовно тонкостінних елементів конструкцій, розрахункові схеми яких відповідають уточненим стержневим моделям повзучості з урахуванням деформацій зсуву. Фізичні й геометричні

рівняння виду (2), (4) для тонкостінного елемента при згині в основному стані теплової повзучості набувають вигляду:

$$\begin{aligned}\varepsilon_x^0 &= \frac{\sigma_x^0}{E} + c_x^0 + \beta \Delta T, & 2\varepsilon_{xz}^0 &= \frac{\tau_{xz}^0}{G} + 2c_{xz}^0, \\ \dot{c}_x^0 &= \Phi \mathfrak{G}_e^0, d^0 \bar{\sigma}_x^0, & 2\dot{c}_{xz}^0 &= 3\Phi \mathfrak{G}_e^0, d^0 \bar{\tau}_{xz}^0, \\ \Phi \mathfrak{G}_e, d &= B \frac{\sigma_e^{n-1}}{1 - d^r \bar{m}}, & \dot{d} &= D \frac{\Phi \sigma_l^0 + 1 - \Phi \bar{\sigma}_e^0 \bar{k}}{1 - (d^0)^r \bar{p}}, \\ d^0(0) &= 0, & d^0(t_*) &= d_*,\end{aligned}\tag{15}$$

$$\varepsilon_x^0 = u_0^0 - z\psi^0, \quad 2\varepsilon_{xz}^0(x, z) = (w^0 - \psi^0) \left(1 - \frac{4z^2}{h^2} \right), \quad u^0 = u_0^0(x) - z\psi^0,$$

де E, G - модулі пружності та зсуву, $B, D, n, m, r, k, p, \Phi$ - сталі величини, d_*, t_* - величина параметру пошкодження і момент часу руйнування, що визначаються за даними опитів по повзучості зразків матеріалу до самого моменту прихованого руйнування; u^0, w^0, ψ^0 - осьове переміщення, прогин осі елемента та повний кут повороту його перерізу.

Геометричні рівняння для елемента у додатковому стані при малому збуренні (7) набувають вигляду:

$$\begin{aligned}\varepsilon_x^{0*} &= u_0^{*'} - z\psi^{*'} + w^0 w^{*'}, & \langle 2\varepsilon_{xz}^{0*} \rangle &= w^{*'} - \psi^* \left(1 + u_0^{*'} \right) - \psi^0 u_0^{*'}; \\ \varepsilon_x^{**} &= \frac{1}{2} \left(w^{*'} \right)^2, & \langle 2\varepsilon_{xz}^{**} \rangle &= -\psi^* u_0^{*'}.\end{aligned}\tag{16}$$

У розділі наведено вид функціоналів (3), (8) - (10) стосовно до розглянутих уточнених стержневих моделей повзучості із співвідношеннями (15), (16), а також одержані системи диференціальних рівнянь, які відповідають умовам стаціонарності цих функціоналів. Далі розглянуті СЕ та функції форм для них, та конкретизовані двох-вузлові стержневі СЕ із п'ятьма ступенями вільності у вузлі, які на відміну від існуючих враховують зсув у перерізі як при пружному деформуванні, так і при повзучості.

У даному розділі, на основі одержаних СЕ - моделей наведені конкретизовані рівняння МСЕ, що відповідають рівнянням (11) - (14). Розглянуто алгоритми, структура і принципи, за якими створено програмну розробку для чисельних розрахунків, наведені тестові приклади. Чисельні розрахунки на повзучість виконувались за схемою методу скінченних елементів у сполученні з покроковим методом Рунге-Кутта-Мерсона, в якому виконана автоматизація вибору кроку у часі. Для визначення елементів матриць та векторів в рівняннях МСЕ застосовано метод Гауса, а для розв'язання на кожному кроці у часі алгебраїчних систем рівнянь МСЕ - метод Холецького і метод Якобі - для пошуку власних значень відповідних матриць.

У дослідженнях із достовірності розробок розглянуто окремі задачі як пружного деформування, коливань та стійкості, так і повзучості з пошкодженням стержневих елементів, наближені розв'язки яких порівняні з відомими аналітичними та експериментальними даними. Вивчено властивості внутрішньої збіжності наближених розв'язків при варіюванні точністю інтегрування рівнянь стану за часом, кількістю СЕ та точок дискретизації в елементі, які введені додатково для збереження даних про розподілення полів деформацій повзучості, напружень та пошкодження в об'ємі тіла при повзучості. Чисельні результати з перерозподілу напружень та змін деформацій у часі у притул до руйнування, що отримані у розглянутих прикладах при різних параметрах дискретизації, свідчать про внутрішню збіжність наближених розв'язків та добру їхню узгодженість із порівняними даними.

У тестових прикладах розглянуті окремі стержні з алюмінієвого сплаву Д16АТ і нержавіючої сталі 316, які мають різні типи закріплення та навантаження. Розглянуто задачі пружності, коливань та стійкості цих стержнів, та задачі повзучості з урахуванням пошкодження внаслідок повзучості.

На рис. 1 наведені дані порівняння результатів чисельного розрахунку (суцільні криві) з експериментальними даними (штрихові криві з маркерами) по повзучості стержня із алюмінієвого сплаву Д16АТ ($T=300\text{ C}$) при різних рівнях осьової сили. На рис. 2 надані порівняння максимального прогину стержня з жорстко закріпленими краями із нержавіючої сталі 316 при поперечному навантаженні тиском. Криві: 1 - відповідають моделі класичної теорії стержнів Бернуллі-Ейлера, 2 - теорії зсуву першого порядку ($k=5/6$), 3 - теорії та методу дисертаційної роботи, 4 - теорії зсуву, що модифікована Науменко і Альтенбахом, 5 - плоским СЕ (PLANE 42) програмного пакету ANSYS.

Рис. 1

Рис. 2

Ці дані, та інші, що наведені в тексті розділу, свідчать про добру їхню узгодженість з порівняними даними.

У четвертому розділі розглянуті результати чисельних досліджень, за результатами яких встановлені закономірності з впливу на спектр власних частот і на граничні рівні стійкості конс-

труктивних елементів, які тривалий час експлуатуються в умовах теплової статичної та динамічної повзучості та мають внаслідок повзучості та пошкодження змінювані у часі параметри основного зрівноваженого стану.

Окремі результати цих досліджень надані на рис. 3, 4, де $N_{кр}$, λ_0 – значення критичної сили втрати стійкості - $N_{кр}$ і мінімальної частоти поперечних коливань, що визначені при пружному деформуванні прямих стержнів із алюмінієвого сплаву Д16АТ ($T=300$ С). На рис. 3 надані залежності для зміни у часі упругості до руйнування мінімальної частоти вільних коливань стержнів, що експлуатуються в умовах повзучості із пошкодженням при розтязі (верхні криві) та при стиску (ніжні криві) осьовими силами - N : 1 - $|N/N_{кр}| = 0.96$, 2 - 0.84, 3 - 0.75, 4 - 0.64. Встановлено, що мінімальна та послідуочі частоти стержнів, що повзуть при розтязі знижуються мало, на 7..9 %, а при стиску – можуть суттєво перевищувати свої початкові значення, майже у 1.5 .. 3.6 рази.

Рис. 3

Рис. 4

Аналогічно, для цих стержнів досліджено втрату стійкості зрівноваженого основного стану при повзучості за даними розрахунку величини критичної сили стиску - $N_{кр}(t)$ при збуренні у часі стержнів їхнім пропорційним навантаженням. На рис. 4 надано зміни у часі упругості до руйнування границі критичних сил стійкості для стержнів, що експлуатуються в умовах повзучості із пошкодженням при розтязі (ніжні криві) та при стиску (верхні криві) осьовими зосередженими – $N(0)$, та розподіленими вздовж стержнів – p силами: 1а - $p=0, N > 0$; 2а - $N=0, p > 0$; 1б - $p=0, N < 0$; 2б – $N = 0, p < 0$. За цими результатами зроблено висновок, що границі критичних сил внаслідок повзучості для стержнів, що повзуть при стиску, мають зростання критичної межі втрати стійкості та ця межа знижається у часі для стержнів, що повзуть при розтязі. Однак, незважаючи на збереження цих закономірностей у випадках повзучості під дією розподілених вздовж стержнів осьових сил, стержні мають коротший час до завершення прихованого руйнування внаслідок повзучості.

Для багатьох з'єднань, що широко застосовують у високотемпературній техніці, використовуються різні шпильки та болти. Для цих елементів найважливішими є релаксаційні процеси, що ведуть до послаблення з'єднань. У цьому розділі досліджено вплив релаксації напружень при повзучості на спектр частот прямих стрижневих елементів із попереднім стисненням або розтягом. На рис.5 наведені дані про вплив часу витримки в умовах релаксації напружень, на першу власну частоту поперечних коливань. Криві - 1-3 відповідають розрахункам елементів із попереднім розтягом, а криві - 4 - 6 - стиском.

Рис. 5

За розрахунковими даними встановлено, що зміна частоти для випадку попереднього стиску складає до 45%, а для попереднього розтягу до 25% в залежності від початкового рівня напружень та часу витримки в умовах релаксації. Релаксація при попередньому стисненні приводить до підвищення частоти, а при попередньому розтязі – до її зниження.

Далі розглянуті чисельні результати щодо визначення змін у спектрі частот та границі критичних сил стійкості для стержнів, що деформуються при різних видах навантаження за умов повзучості. Встановлено, що витримка стержнів в умовах повзучості при сумісній дії осьового стискання та поперечного навантаження веде до збільшення у часі мінімальної частоти поперечних коливань. Між тим, в умовах динамічної повзучості в основному стані, що здійснюється за рахунок додавання до постійній складовій малого швидко змінюваного циклічного навантаження, не тільки скорочується час до руйнування, але й при порівнянні із статичною повзучістю істотно зменшуються у часі значення мінімальної власної частоти. У розділі наведені чисельні результати за дослідженнями з впливу динамічної повзучості в основному стані на границю критичної сили втрати стійкості стержневих елементів конструкцій.

У розділі надані чисельні результати дослідження по повзучості із пошкодженням в полі відцентрових сил робочих лопаток другої ступені газової турбіни. Визначено ресурс лопатки та її витяг за час експлуатації. У спеціальному дослідженні встановлено, що практично не суттєвим є вплив повзучості із пошкодженням в полі відцентрових сил робочих лопаток на її мінімаль-

ну власну частоту поперечних коливань. Ці результати обґрунтовують достовірність припущення про збереження в умовах повзучості власного спектру частот лопатки, що було використано раніше у розрахунках на циклічну повзучість цієї ж лопатки, результати яких опубліковані Д.В. Бреславським.

П'ятий розділ присвячено дослідженню міцності та безпеки довгомірних металокерамічних контейнерів-упаковок (ДМКУ), які проектується у ННЦ "ХФТІ". Контейнери призначені для транспортування і захоронення твердих радіоактивних відходів (ТРВ) АЕС. Загальну схему конструкції ДМКУ надано на рис. 6, де позначено: 1, 2 – гільзи із сталі X18H10T; 3 - захисний шар із керамічного композитного поглинача (ККМ-П); 4 - торцеві фланці; 5, 7 – сталеві і композитні (ККМ-П) заглушки; 6 - тверді радіаційні відходи.

Рис 6

У розділі наведені результати розрахунків, що одержані на основі створених в роботі методів і програмних розробок, за якими досліджено повзучість та тривалу міцність контейнеру довжиною $\cong 2.3$ м, призначеного для транспортування та захоронення ТРВ у вертикальному положенні. Отримані оцінки ресурсу і тривалої міцності ДМКУ, що експлуатуються в умовах терморадіаційної повзучості і об'ємного розпухання при опромінюванні радіаційним потоком від твердих радіаційних відходів. Аналіз повзучості із пошкодженням за умов тривалого захоронення ТРВ виконано у припущенні, що контейнери піддані дії власної ваги, яка складає для різних варіантів від 200 до 325 кг, і інерційного навантаження з коефіцієнтом динамічності $n = a / g \cong 2.2$ під час транспортування. Визначено вплив пошкодження, що накопичується під час транспортування до місця захоронення, на релаксацію напружень та тривалість прихованого руйнування в умовах терморадіаційної повзучості в металевих елементах складної конструкції ДМКУ. У цьому ж розділі наведені дані розрахунків щодо контейнеру довжиною 3,8 м, який призначено для транспортування у горизонтальному положенні та захороненні у вертикальному положенні.

Рис. 7

На рис.7 надані порівняння цих варіантів ДМКУ за даними про зміну параметру пошкодження – d для зовнішньої гільзи контейнерів у термін збереження ТРВ в місці захоронення. За розрахунковими даними для ДМКУ, що транспортуються у горизонтальному положенні, одержані криві: 1 – при врахуванні втомних пошкоджень за час транспортування, та 2 – при нехтуванні останніми. Крива 3 відповідає розрахункам для ДМКУ, що транспортуються і зберігаються вертикально. За порівняльними даними встановлено, що контейнери, які призначені для транспортування і збереження у вертикальному положенні, мають вищі показники з безпеки транспортування і збереження ТРВ АЕС.

ВИСНОВКИ

Дисертаційну роботу присвячено розробці методів для визначення впливу теплової і радіаційної повзучості на коливання та стійкість елементів тонкостінних конструкцій, на основі яких виконані чисельні дослідження і отримані оцінки різних видів відклику конструкцій на можливі за умов експлуатації збурення основного стану конструкцій при повзучості.

Основні висновки за результатами роботи, зводяться до наступного:

1. Надано розвиток методів розрахунку на повзучість і тривалу міцність елементів конструкцій за рахунок створення нового методу для визначення впливу теплової і радіаційної повзучості на коливання і стійкість при змушеному відхиленні в “малому” від основного стану.
2. Запропоновано методи для чисельного розрахунку повзучості та аналізу відклику елементів конструкцій на збурення, що базуються на методі скінченних елементів та на спільному розв’язанні початково-крайових задач повзучості тіл у “основному” стані і задач про коливання і стійкість зрівноваженого стану тіл при змушеному відхиленні в “малому” від основного стану.
3. Створені програмні розробки для визначення впливу теплової і радіаційної повзучості на коливання і стійкість тонкостінних елементів конструкцій, розрахункові схеми яких відповідають уточненим моделям повзучості стержнів.

4. Досліджена ступень достовірності розробок за розв'язанням окремих задач як пружного деформування, коливань та стійкості, так і повзучості з пошкодженням стержневих елементів, наближені розв'язки яких порівняні з відомими аналітичними та експериментальними даними. Чисельні результати, що отримані при різних параметрах дискретизації, у розглянутих прикладах свідчать про внутрішню збіжність наближених розв'язків та добру їхню узгодженість із порівняними даними.
5. Уперше визначені якісні і кількісні закономірності впливу статичної і динамічної повзучості стержневих елементів конструкцій, утому числі для кріпильних з'єднань в умовах релаксації напружень при повзучості, робочих лопаток газової турбіни при повзучості, які дозволили встановити зміни в їхньому спектрі частот і межі критичних сил втрати стійкості.
6. Отримані практично важливі оцінки з безпеки транспортування і збереження металокерамічних контейнерів-упаковок з радіоактивними відходами АЕС, які проєктуються у Національному науковому центрі "Харківський фізико-технічний інститут".

НАУКОВІ ПРАЦІ, ОПУБЛІКОВАНІ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Ашихмин В.П., Бирюков О.В., Канцедал В.П., Мельтюхов М.В., Морачковский О.К., Неклюдов И.М., Сердюк В.Г. Влияние транспортировки на долговечность металлокерамических контейнеров-упаковок с высокоактивными твердыми радиоактивными отходами // Труды XV международной конференции по физике радиационных явлений и радиационному материаловедению. - 2002. - С. 210-211.
2. Мельтюхов М.В. Влияние предварительной ползучести и релаксации стержней на собственные частоты изгибных колебаний // Вісник ХДТУС. - 2002. - Вип. 10. - С. 316-319.
3. Мельтюхов В.М. Моделирование повреждаемости гибких стержней в условиях ползучести // Труды международного симпозиума по механике разрушения материалов и конструкций. - Белосток (Польша). - 2001.
4. Мельтюхов М.В. Моделирование явления тепловой ползучести материалов // Вісник Інженерної академії України (частина 2). - 2001. - № 3. – С. 44-47.
5. Мельтюхов М.В., Морачковский О.К. Виброползучесть гибких стержней // Вісник Інженерної академії України. - 2000. - С. 371-374.
6. Мельтюхов М.В., Морачковский О.К. Влияние ползучести на собственные частоты и на устойчивость стержневых элементов конструкции // Труды одесского политехнического университета 2001. - вип. 5. - С. 140-143.
7. Мельтюхов М.В. Расчеты на ползучесть стержневых элементов конструкций с учетом де-

АНОТАЦІЯ

Мельтюхов М.В. Методи визначення впливу теплової і радіаційної повзучості на коливання та стійкість елементів конструкцій. – Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 01.02.04 - механіка деформівного твердого тіла. Національний аерокосмічний університет ім. М.Є. Жуковського "Харківський авіаційний інститут". - Харків, 2003.

Дисертацію присвячено розробці методів для визначення впливу теплової і радіаційної повзучості на коливання та стійкість елементів тонкостінних конструкцій, на основі яких виконані чисельні дослідження і отримані оцінки різних видів відклику конструкцій на можливі за умов експлуатації збурення їхнього основного стану при повзучості.

Надано розвиток методів розрахунку на повзучість і тривалу міцність елементів конструкцій за рахунок створення нового методу для визначення впливу теплової і радіаційної повзучості на коливання та стійкість конструкцій при змушеному відхиленні в “малому” від основного стану. Запропоновані методи для чисельного розрахунку, що базуються на методі скінченних елементів та на спільному розв’язанні початково-крайових задач повзучості у “основному” стані і задач про коливання і стійкість зрівноваженого стану конструктивних елементів при збуренні основного стану.

Створені програмні розробки для визначення впливу теплової і радіаційної повзучості на коливання і стійкість тонкостінних елементів конструкцій, розрахункові схеми яких відповідають уточненим моделям повзучості стержнів. Досліджено ступень достовірності розробок за розв’язанням окремих задач повзучості з пошкодженням, коливань і стійкості стержневих елементів. Чисельні результати, отримані при різних параметрах дискретизації, свідчать про внутрішню збіжність наближених розв’язків та про добру їхню узгодженість при порівнянні з відомими аналітичними та експериментальними даними. Уперше визначені якісні і кількісні закономірності впливу терморадіаційної і динамічної повзучості стержневих елементів конструкцій, утому числі для попередньо стягнутих кріплень у з’єднаннях в умовах релаксації напружень при повзучості, робочих лопаток газової турбіни при повзучості в полі відцентрових сил, які дозволили встановити зміни в їхньому спектрі частот і межі критичних сил втрати стійкості.

Отримані практично важливі оцінки з безпеки транспортування і збереження металокерамічних контейнерів-упаковок з радіоактивними відходами АЕС, які проектуються у Національному науковому центрі “Харківський фізико-технічний інститут”.

Ключові слова: тонкостінні конструкції, стержневий елемент, деформації повзучості, терморадіаційна та динамічна повзучість, пошкодження, метод скінченних елементів, збурення основного стану, коливання, критична сила втрати стійкості, спектр власних частот.

ABSTRACT

Meltyukhov M.V. Methods for determination of heat and radioactive creep effect on vibration and buckling of structure elements. – Manuscript.

Thesis for a candidate of technical science degree by the specialty 01.02.04 - mechanics of the deformable solids. National aerospace university “Kharkov aviatonal institute”, Kharkov, 2003.

With use of the developed method for determination of creep effect on vibration and buckling of structure elements the development of creep and destruction theory methods is made.

The new method for determination of creep effect on structure element vibrations and buckling is based on the combined solution of beginning-bounded creep problem at the “main” state and solution of the natural vibrations and buckling problem, caused by a forced deflection at “small” out of the main state.

Some program products, which allow to fulfill numeric investigations of heat, dynamic and radioactive creep and determinate its effect on vibration and buckling of the beam structure elements are developed.

The ground of model reliabilities and calculation methods offered is given. It is found out, that obtained solutions at some examples are in good agreement with known experimental, analytical and numeric data which were obtained by another authors and by another methods.

Some quantitative and qualitative regularities of creep influence of precisely defined beam on its eigenvalues and bounds of critic buckling loads are found out at first. The effect of assembly stress relaxation on eigenvalues of beam elements is investigated.

Applied calculation of prolonged strength of metal-ceramic container for transportation and storing of radioactive wasted products is made.

Key words: thin-walled structures, beam element, creep deformation, heat-radioactive and dynamic creep, damage, method of finite elements, indignation of main state, vibration, critical power of buckling, spectrum of natural frequencies.

АННОТАЦІЯ

Мельтюхов М.В. Методы определения влияния тепловой и радиационной ползучести на колебания и устойчивость элементов конструкций. – Рукопись.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 01.02.04 - механика деформированного твердого тела. Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского "Харьковский авиационный институт". - Харьков, 2003.

Дано развитие методам теории ползучести и разрушения тел за счет созданных в работе методов для определения влияния тепловой, динамической и радиационной ползучести на колебания и устойчивость тонкостенных элементов конструкций.

Предложена общая математическая постановка проблемы. Сформулированы начально-краевые задачи тепловой, динамической и радиационной ползучести пространственных тел, деформирующихся в "основном" состоянии при статическом и быстро осциллирующем нагружении, а также сформулированы разные постановки задач о деформировании тел при вынужденном отклонении в "малом" от основного состояния. Последние отвечают задачам об установившихся вынужденных и свободных колебаниях и устойчивости основного равновесного состояния.

Предложен новый метод для определения влияния ползучести на колебания и устойчивость элементов конструкций, который основан на совместном решении начально-краевых задач ползучести тел в "основном" состоянии и задач о колебаниях и устойчивости тел, вследствие их вынужденного отклонения в "малом" от основного состояния.

Для определения параметров деформирования тел в основном состоянии, предложено совместное использование метода конечных элементов и схему метода Рунге-Кутты-Мерсона с автоматизированным выбором шага интегрирования для продолжения решений во времени. Разрешающие уравнения КЭ - моделей тел построены на основе специальных функций форм и многоточечных квадратур Гаусса, а для их решения на каждом шаге времени применен метод Холецкого. Для определения собственных значений матриц КЭ - моделей использован метод Якоби.

Созданы программные разработки, позволяющие выполнять численные исследования тепловой, динамической и радиационной ползучести и определять их влияние на колебания и устойчивость элементов конструкций, расчетные схемы которых отвечают уточненным стержневым моделям. Последние учитывают поперечный сдвиг, существенно влияющий на адекватность моделей при описании ползучести тонкостенных конструкций.

Дано обоснование достоверности предложенных моделей и методов расчетов. Полученные решения оценены данными о внутренней сходимости приближенных решений за счет варьирования параметрами дискретизации - количеством КЭ, порядком квадратур и точности интегрирования по времени. Кроме данных о сходимости приближенных решений установлено, что полученные решения хорошо согласуются в отдельных примерах с известными экспериментальными данными и численными результатами, ранее полученными другими авторами и методами.

Впервые определены качественные и количественные закономерности влияния терморрадиационной и динамической ползучести элементов конструкций, расчетные схемы которых отвечают уточненным моделям ползучести стержней, на их спектре частот и пределы критических сил потери устойчивости. Изучено влияние релаксации монтажных напряжений при ползучести на спектр частот стержневых элементов конструкций.

Выполнены прикладные расчеты на длительную прочность двух вариантов металлокерамических контейнеров-упаковок (ДМКУ), предназначенных для транспортировки и захоронения радиоактивных отходов и отработанных ТВС АЭС. Практические рекомендации и выводы, полученные по расчетным данным, использованы при выполнении работ по проектированию ДМКУ в Институте Физики твердого тела, Материаловедения и Технологии Национального научного центра “Харьковский физико-технический институт”, что подтверждено актом, помещенном в приложении.

Ключевые слова: тонкостенные конструкции, стержневой элемент, деформации ползучести, терморрадиационная и динамическая ползучесть, повреждаемость, метод конечных элементов, возмущение основного состояния, колебание, критическая сила потери устойчивости, спектр собственных частот.