

НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
"ХАРКІВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ"

Замула Олексій Олександрович

УДК 539.3

**РОЗРАХУНКОВИЙ МЕТОД ОЦІНЮВАННЯ ДОВГОВІЧНОСТІ
ПРИ ДИНАМІЧНІЙ ПОВЗУЧОСТІ
ОБОЛОНКОВИХ ЕЛЕМЕНТІВ КОНСТРУКЦІЙ**

Спеціальність 05.02.09 – динаміка та міцність машин

Автореферат
дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Харків - 2007

Дисертацією є рукопис.

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

Науковий керівник: доктор технічних наук, професор,
Морачковський Олег Костянтинович,
Національний технічний університет
“Харківський політехнічний інститут”, м. Харків,
завідувач кафедри теоретичної механіки

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, старший науковий співробітник,
Зайцев Борис Пилипович,
Інститут проблем машинобудування ім. А.М. Підгорного
НАН України, м. Харків,
старший науковий співробітник відділу вібраційних та тер-
моміцностних досліджень

кандидат технічних наук, старший науковий співробітник,
Лисенко Сергій Вікторович,
Національний технічний університет
„Харківський політехнічний інститут”, м. Харків,
провідний науковий співробітник кафедри динаміки та міц-
ності машин

Захист відбудеться **“24” жовтня 2007 р. о 16³⁰ год.** на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 64.050.10 у Національному технічному університеті “Харківський політехнічний інститут” за адресою: 61002 м. Харків, вул. Фрунзе, 21.

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Національного технічного університету “Харківський політехнічний інститут”.

Автореферат розісланий **“12” вересня 2007 р.**

Вчений секретар спеціалізованої
вченої ради Д 64.050.10

В.Г. Сукіасов

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. При тривалій експлуатації машин і споруд в умовах постійно діючого навантаження і високих температур їхні конструкційні елементи зазнають пошкоджень і незворотного деформування. Велику кількість конструкційних елементів високотемпературної техніки – авіаційної, ракетно-космічної, хімічних реакторів – складають тонкостінні оболонки обертання, що осесиметрично деформуються при комбінованому статичному й циклічному навантаженні. Тому у розрахунках на конструкційну міцність сучасної техніки особливе місце посідають розрахунки на повзучість і тривалу міцність тонких оболонкових елементів конструкцій.

Традиційно, довговічність елементів машин при повзучості оцінюють, проводячи розрахунки на усталену повзучість з метою визначення еквівалентних напружень для подальшої оцінки часу до руйнування за критерієм тривалої міцності матеріалу виробу. На теперішній час більш достовірні оцінки тривалої міцності конструкційних елементів машин в умовах повзучості проводять на підставі розрахунків на неусталену внаслідок пошкодження матеріалів повзучість, що уточнює оцінки часу до руйнування майже до 40%. Незважаючи на цей факт, за відсутності саме методів розрахунку на повзучість з пошкодженням можливості у застосуванні цього підходу залишаються обмеженими.

У вітчизняній та закордонній науковій літературі найбільш досліджено повзучість тонкостінних елементів конструкцій при статичному навантаженні на підставі припущень про малі деформації й прогини стінок, відсутність поперечного зсуву. Між тим, залишаються мало вивченими питання щодо впливу процесів динамічної повзучості з пошкодженням, незворотного формоутворення при поперечних деформаціях зсуву та порівняних з товщиною прогинів оболонок на кількісні та якісні оцінки їхньої довговічності. Не менш важливим є вивчення цих питань для створення технологій гарячого формоутворення заготовок, що застосовують для виготовлення тонкостінних виробів. Роботу присвячено створенню розрахункового методу оцінювання міцності й довговічності тонкостінних оболонкових елементів машин при осесиметричному геометрично нелінійному деформуванні з незворотнім формоутворенням і пошкоджуваністю за умов статичної та динамічної повзучості. Тому тема дисертаційної роботи є актуальною, розробки за темою мають теоретичну цінність для спеціальності динаміка та міцність машин і є практично важливими для сучасного машинобудування.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дисертаційна робота підготовлена на кафедрі теоретичної механіки НТУ "ХПІ" за держбюджетними темами МОН України: «Створення методів аналізу нелінійних динамічних процесів, біфуркацій та повзучості в тонкостінних конструкціях» (№ Д.Р. 0103U001486, 2003-2005 рр.); «Створення методів аналізу неліній-

ної динаміки і повзучості деформованих тіл та дискретних систем» (№ Д.Р. 0106U001465, 2006-2008 рр.), де здобувач був виконавцем окремих розділів.

Метою роботи є розробка на базі МСЕ розрахункового методу оцінювання міцності й довговічності тонкостінних оболонкових елементів машин при осесиметричному геометрично нелінійному деформуванні з незворотнім формоутворенням і пошкоджуваністю за умов статичної та динамічної повзучості.

Задачі дослідження містять:

- формулювання загальної та скінченно-елементної математичної постановки задач статичної й динамічної повзучості тонкостінних оболонок при осесиметричному геометрично нелінійному деформуванні з незворотнім формоутворенням і пошкоджуваністю з урахуванням поперечного зсуву;

- створення розрахункового методу і програмного забезпечення для оцінювання короткочасної міцності, формоутворення й довговічності оболонкових елементів машин;

- чисельні дослідження достовірності запропонованого методу на підставі розв'язування окремих відомих задач пружного аналізу і коливань та стаціонарної й динамічної повзучості пластин і оболонок;

- дослідження термоміцності при проектуванні розмежувальної стінки вакуумної камери пристрою для водоочищення пучками заряджених частинок;

- визначення впливу вібраційної складової навантаження на довговічність, формоутворення, пошкоджуваність і час до завершення прихованого руйнування для пластинчастих та оболонкових конструкційних елементів;

- дослідження з впливу вібраційної складової тиску на гаряче формоутворення плоских та оболонкових заготовок.

Об'єкт дослідження – оболонкові елементи конструкцій машин: стінки камер термофізичного обладнання, двигунів, реакторного обладнання, днища, труби, корпуси енергетичних машин.

Предмет дослідження – короткочасна міцність й довговічність при стаціонарній та динамічній повзучості з незворотнім формоутворенням і пошкоджуваністю осесиметричних тонкостінних елементів конструкцій.

Методи дослідження. За основу прийнято теоретичні методи теорії тонких оболонок й теорії повзучості, а також чисельні методи для розв'язання початково-крайових задач механіки: метод скінченних елементів, метод Рунге-Кутта-Мерсона, методи Ньютона-Канторовича для зведення системи нелінійних алгебраїчних рівнянь до послідовності систем лінійних алгебраїчних рівнянь й метод Холецкого для їхнього розв'язування, метод Якобі для визначення частот та форм власних коливань, метод Гауса для розв'язування СЛАР з матрицею “динамічної жорсткості” в задачах про вимушені коливання, метод квадратур Гауса

для визначення елементів матриць й векторів розв'язувальної системи рівнянь МСЕ.

Наукова новизна одержаних результатів полягає в наступному:

- отримали подальший розвиток методи розрахунків міцності й довговічності в динаміці та міцності машин за рахунок створення нового розрахункового методу оцінювання міцності й довговічності тонкостінних оболонкових елементів машин за умов статичної та динамічної повзучості;

- надано формулювання загальної та скінченно-елементної математичної постановки задач статичної та динамічної повзучості оболонкових елементів машин при осесиметричному геометрично нелінійному деформуванні з незворотнім формоутворенням і пошкоджуваністю з урахуванням поперечного зсуву, на базі яких створені розрахунковий метод і програмне забезпечення для оцінювання короточасної міцності, формоутворення й довговічності тонкостінних оболонок;

- одержано розв'язок прикладної задачі раціонального проектування при зміні геометричної конфігурації розмежувальної стінки камери виводу пучків заряджених частинок пристрою для водоочищення за співставленням оцінок з термоміцності;

- на новій теоретичній основі визначено вплив вібраційної складової навантаження на довговічність, формоутворення, пошкоджуваність і час до завершення прихованого руйнування внаслідок повзучості для пластинчастих та оболонкових конструкційних елементів;

- на підставі дослідження з впливу вібраційної складової тиску на гаряче формоутворення плоских та оболонкових заготовок отримано нові результати щодо технологічного процесу формоутворення оболонкових елементів конструкцій при обробці заготовок тиском з додаванням осцилюючої складової.

Практичне значення одержаних результатів полягає в запропонованому розрахунковому методі оцінювання короточасної міцності й довговічності при динамічній повзучості тонкостінних оболонкових елементів машин, що дозволяє оцінити термоміцність і вплив статичної та динамічної повзучості з пошкодженням на граничний термін експлуатації машин, вплив вібраційної складової тиску на гаряче формоутворення плоских та оболонкових заготовок. Метод і програмне забезпечення можна використовувати в наукових та прикладних дослідженнях, при проектуванні відповідальної високотемпературної техніки – авіаційної, ракетно-космічної, хімічних реакторів тощо. Результати роботи використано в НТУ «ХПІ» при виконанні держбюджетних науково-дослідних тем і в Інституті плазмової електроніки та нових методів прискорення Національного Наукового Центру "Харківський фізико-технічний інститут" при обґрунтуванні вибору форми розмежувальної стінки камери для обробки води електронним пучком.

Особистий внесок здобувача. Основні результати, що надані в дисертації, отримані здобувачем особисто. Серед них: математичні постановки задач на базі МСЕ та чисельні методи й програмне забезпечення розрахунків з динамічної повзучості оболонкових конструкційних елементів машин з урахуванням поперечного зсуву, геометричної нелінійності й пошкоджуваності; дані тестування; одержані оцінки з довговічності елементів енергетичного обладнання (труби, кришки, днища тощо), з термоміцності розмежувальної стінки вакуумної камери для обробки води електронними пучками, дані з незворотного формоутворення оболонок за технологією гарячого формоутворення при динамічній повзучості; аналіз одержаних результатів.

Апробація результатів дисертації. Основні результати дисертаційної роботи доповідалися, обговорювалися й одержали позитивну оцінку на IV, V, VIII міжнародних науково-технічних конференціях «Фізичні та комп'ютерні технології в народному господарстві» (м. Харків, 2000, 2001, 2003 р.), на X, XII - XIV міжнародних науково-практичних конференціях «Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я» (м. Харків, 2002, 2004-2006 рр.), на International Conference «Nonlinear Dynamics» (м. Харків, 2004 р.); на наукових семінарах кафедри теоретичної механіки НТУ «ХП» протягом 2002-2006 рр.

Публікації. Основні наукові положення і результати досліджень за темою дисертаційної роботи опубліковані в 9 друкованих працях, серед яких 5 – у фахових виданнях за переліком ВАК України.

Структура і обсяг дисертації. Дисертаційна робота складається зі вступу, 5 розділів, висновків і додатків. Повний обсяг дисертації складає 181 сторінку, з них 133 – основного тексту; 11 таблиць; 75 ілюстрацій, з них за текстом – 25; 146 найменувань використаних літературних джерел на 13 сторінках, 2 додатки на 2 стор.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** обґрунтовано актуальність, теоретичну та практичну цінність теми дисертаційної роботи, сформульовано мету та задачі дослідження роботи, охарактеризовано новизну і практичну значимість наукових результатів, представлені дані про зв'язок роботи з науковими програмами, планами і темами, наведено інформацію про апробацію роботи та публікації основних результатів.

У **першому розділі** на основі літературних джерел, які опубліковані у вітчизняних та закордонних виданнях, надано оцінку стану проблеми за темою дисертації. Відзначено, що суттєвий доробок в розрахункові методи динаміки та міцності й довговічність елементів конструкцій отримали Х. Альтенбах, М.І. Бобир, Дж. Бойл, Д.В. Бреславський, А.В. Бурлаков, О.З. Галішин, П.П. Гонтаровський, В.П. Голуб, Б.Ф. Зайцев, О.О. Золочевський, Л.М. Качанов,

Дж. Леметр, Г.І. Львов, С.В. Лисенко, М.М. Малінін, Ю.І. Матюхін, Д.Л. Маріот, М.С. Можаровський, О.К. Морачковський, С. Мураками, К.В. Науменко, В.О. Постнов, В.П. Пошивалов, Ю.М. Работнов, К.І. Романов, К.М. Рудаков, О.В. Соснін, С. Тайра, Д. Хейхерст, Ю.М. Шевченко, С.О. Шестеріков та інші. Відзначено, що повзучість матеріалів і конструкцій при статичному навантаженні досліджена досить повно, у той же час у науково-технічній літературі знайдено невелику кількість розв'язків прикладних задач повзучості елементів машинобудівних конструкцій, що експлуатуються в умовах циклічного навантаження.

Подано відомі моделі руйнування при повзучості для випадків в'язкого, крихкого і змішаного руйнування, а також технічні теорії повзучості, що знайшли широке застосування у практичних дослідженнях і аналітичні залежності для опису кривих повзучості. Представлено в основному сучасні методи розрахунків на повзучість і тривалу міцність. Вказано умови застосування ряду відомих рівнянь стану для адекватного опису повзучості. Наведено моделі, що узагальнюють одноосні моделі циклічної повзучості для випадку складного напруженого стану. Описано експериментально встановлені закономірності повзучості і тривалої міцності матеріалів при циклічному навантаженні. Сформульовано основні задачі досліджень за темою дисертації.

У другому розділі математично сформульовано загальну та скінченно-елементну постановку задач статичної й динамічної повзучості тонкостінних оболонок при осесиметричному геометрично нелінійному деформуванні з урахуванням поперечного зсуву. Створено розрахунковий метод для оцінювання короткочасної й довготривалої міцності, пошкодження, незворотного формоутворення й часу до руйнування внаслідок повзучості щодо аналізу довговічності оболонкових елементів машин.

Розглянуто загальну математичну постановку задач динамічної повзучості з пошкоджуваністю для тіла об'ємом V , з поверхнею $S=S_p \& S_u$, що закріплено на поверхні S_u й на поверхні S_p якого діє циклічно змінюваний з частотою Ω тиск: $p_{in} = p_{in}^0(1+A_p \sin \Omega t)$, $A_p = p_{in}^a / p_{in}^0$.

Виходячи з того, що в координатній системі $Ox_1x_2x_3$ початково-крайові задачі повзучості тіл в умовах накладених швидко осцилюючих полів (поверхневого тиску) з точністю асимптотичних розкладань зводяться до зв'язаної системи двох видів:

- початково-крайової задачі повільного (основного) руху континуума:

$$y_{ij,j} + f_j = 0, \quad e_{ij} = c_{ijkl} y_{kl} + b_{ij} \Delta T + c_{ij}, \quad e_{ij} = 1/2(u_{i,j} + u_{j,i}), \quad (1)$$

з рівнянням стану:

$$dc_{ij}/dt = 3/2 \cdot BH(A, n) y_i^{n-1} s_{ij} / (1 - u_i^r)^k, \quad du_i/dt = DK(A, m) y_e^m / (1 - u_i^r)^L, \quad (2)$$

$$A = y_i^a / y_i, \quad y_e = \bar{b} \cdot \max(y_1, y_2, y_3) + (1 - \bar{b}) y_i$$

$$y_{ij}n_j = p_{in}, \text{ для усіх } x_i \text{ з } S_p; u_i(x_i, 0) = u_{i0}(x_i), \text{ для усіх } x_i \text{ з } S_u \quad (3)$$

$$c_{ij}(x_i, 0) = 0, \quad \psi(0) = 0, \quad \psi(t_*) = \psi_*,$$

і початково-крайової задачі для вимушених вібрацій вихідного пружного тіла:

$$y_{ij}^a = -\Pi^2 c u_i^a, \quad 1/2(u_{i,j}^a + u_{j,i}^a) = c_{ijkl} y_{kl}^a, \text{ для усіх } x_i \text{ з } V; \quad (4)$$

$$y_{ij}^a n_j = p_{in}^a, \text{ для усіх } x_i \text{ з } S_p, \quad u_i^a = u_{i-} \text{ для усіх } x_i \text{ з } S_u,$$

де:

u_i, u_{i-} – переміщення точок тіла та незмінювані у часі їхні значення на частині поверхні S_u ;

$y_{ij}(s_{ij}), y_k (k=1,2,3), y_i, y_e$ – тензор (девіатор) напруження, головні значення тензору напружень та інтенсивність напружень Мізесу, еквіваленті напруження;

e_{ij}, c_{ij}, ψ – тензори повних й незворотних деформацій повзучості, параметр пошкодження;

ψ_*, t_* – критичні значення параметру пошкоджуваності та часу до завершення прихованого руйнування;

$B, D, n, m, k, l, r, \delta$ – матеріальні константи, що визначаються за даними базових експериментів;

u_i^a, y_{ij}^a, y_i^a – амплітудні переміщення, тензор й інтенсивність напружень Мізесу;

c_{ijkl}, c – тензор пружних властивостей та густина матеріалу.

Системи (1) – (4) розглядаються сумісно, спочатку вирішується система рівнянь (4) і система (1) – (3) при відсутності деформацій повзучості в початковий момент часу $t=0$ год. Далі, на цій основі розв’язують систему (1) – (3).

При статичній повзучості, коли $A=0, H(A, n) = K(A, m) = 1$, задача зводиться до розв’язування спрощеної до звичайної системи (1) – (3) з рівняннями стану (2), що відповідають теорії повзучості Бейлі-Нортон-Работнова-Качанова.

Основні кінематичні та статичні рівняння теорії тонких оболонок сформульовано в роботі в межах гіпотез Тимошенка при малих деформаціях з урахуванням зсуву й при порівняних з товщиною прогинів оболонок. У цьому випадку, якщо позначити u, w, z_s – осьові, нормальні переміщення й кут зсуву; $\Pi_{ss}, \Pi_{\psi\psi}, 2\Pi_{sz}, \psi_{ss}, \psi_{\psi\psi}$ – осьові, окружні, зсувні деформації й зміни кривизн серединної поверхні оболонки з твірною, що надано на рис. 1, то напруження у довільній точці оболонки пов’язані з переміщеннями її серединної поверхні за співвідношеннями:

Рис. 1. Твірна оболонки

$$y_{ss} = E_1 / (1 - \nu_1 \nu_2) \cdot [(\Pi_{ss} + \nu_2 \Pi_{\psi\psi}) + z(\psi_{ss} + \nu_2 \psi_{\psi\psi})] + y_{ss-}$$

$$y_{\psi\psi} = E_2 / (1 - \nu_1 \nu_2) \cdot [(\Pi_{\psi\psi} + \nu_1 \Pi_{ss}) + z(\psi_{\psi\psi} + \nu_1 \psi_{ss})] + y_{\psi\psi-}$$

$$y_{sz} = 2G_{sz} \Pi_{sz} + y_{sz-} \quad (5)$$

де

y_{ss-} , $y_{\text{шш-}}$, y_{sz-} – додаткові напруження від температурних деформацій та незворотних деформацій повзучості:

$$\begin{aligned} y_{ss-} &= -E_1/(1-\nu_1\nu_2) \cdot [(\bar{\sigma}_1 + \bar{\sigma}_2 \nu_2) \Delta T + (c_{ss} + \nu_2 c_{\text{шш}})] \\ y_{\text{шш-}} &= -E_2/(1-\nu_1\nu_2) \cdot [(\bar{\sigma}_2 + \bar{\sigma}_1 \nu_1) \Delta T + (\nu_1 c_{ss} + c_{\text{шш}})] \\ y_{sz-} &= -2G_{sz} c_{sz} \\ e_{ss} &= \text{Ш}_{ss} + z \chi_{ss}, \quad e_{\text{шш}} = \text{Ш}_{\text{шш}} + z \chi_{\text{шш}}, \quad e_{sz} = \text{Ш}_{sz}, \quad \text{Ш}_{ss} = du/ds + 0.5(dw/ds)^2, \\ 2\text{Ш}_{sz} &= z_s + dw/ds, \quad \chi_{ss} = dz_{sz}/ds, \quad \chi_{\text{шш}} = 1/r \cdot [z_s \sin u + \cos u / r (u \sin u + w \cos u)]. \end{aligned} \quad (6)$$

У подальшому співвідношення (5) розглядаються відносно переміщень як геометрично нелінійні за рахунок доданку підкресленого в (6).

Далі в цьому розділі для розв'язування початково-крайової задачі повзучості у «повільному» часі на основі функціоналу типу Лагранжа сформульовано скінченно-елементну постановку. Прийнято, що оболонку обертання з довільною твірною при осесиметричному напружено-деформованому стані розбито на скінченні елементи у вигляді усічених конусів і функції форм в межах елемента ($-1 \leq \sigma = (2s-L)/L \leq 1$) мають вид:

$$\begin{aligned} u &= q_1 N_1 + 0.5 L q_2 N_2 + q_7 N_3 + 0.5 L q_8 N_4, \quad w = q_3 N_1 + 0.5 L q_4 N_2 + q_9 N_3 + 0.5 L q_{10} N_4, \\ z_{sz} &= q_5 N_1 + 0.5 L q_6 N_2 + q_{11} N_3 + 0.5 L q_{12} N_4 \\ N_1 &= 0.25(1-\sigma)^2(2+\sigma), \quad N_2 = 0.25(\sigma-1)(\sigma^2-1), \\ N_3 &= 0.25(1+\sigma)^2(2-\sigma), \quad N_4 = 0.25(\sigma-1)(\sigma+1)^2, \end{aligned}$$

де

$q = \{q_i\} = \{u_0, u_0', w_0, w_0', z_{s0}, z_{s0}', u_1, u_1', w_1, w_1', z_{s1}, z_{s1}'\}^T$ – вектор узагальнених координат для елемента з 6-ма степенями вільності у вузлі.

Розглянуто функціонал типу Лагранжа з додатковими напруженнями. Варіаційну рівність для функціоналу типу Лагранжа з додатковими напруженнями, що є нелінійним відносно шуканих переміщень на кроці часу, за схемою методу Ньютон-Канторовича перетворено в послідовність лінійних варіаційних рівностей. Після чого, для розв'язку задачі повзучості на кроці часу одержано СЛАР відносно прирощення вектору глобальних узагальнених координат:

$$K(q^{(i)}) \Delta q \sim -F(q^{(i)}), \quad \Delta q \sim q^{(i+1)} - q^{(i)}, \quad i=0,1,2,\dots, \quad q^{(0)} = 0, \quad (7)$$

де:

$q^{(i+1)}$, $q^{(i)}$ – вектори узагальнених координат на наступній та попередній ітераціях;

$K(q^{(i)})$, $F(q^{(i)})$ – глобальна матриця «змінної жорсткості» та вектор зведених до вузлів СЕ поверхневих сил, і тих сил, що зумовлені додатковим напруженням від температурних й незворотних деформацій повзучості та геометричною нелінійністю на i -му кроці ітерації.

Рівняння (7) доповнюються кінетичними рівняннями стану (2), які за означенням $y(t) = (c_{ss}, c_{uy}, c_{sz}, u)^T$, $f = (f_1, f_2, f_3, f_4)^T$ приймають вигляд:

$$dy/dt = f(q, u; t), \quad (8)$$

$$\begin{aligned} f_1 &= 3/2 \cdot BH(A) y_i^{n-1} s_{ss} / (1-u)^k, & f_2 &= 3/2 \cdot BH(A) y_i^{n-1} s_{uy} / (1-u)^k, \\ f_3 &= 3 \cdot BH(A) y_i^{n-1} s_{sz} / (1-u)^k, & f_4 &= DK(A) y_e^m / (1-u)^L \end{aligned} \quad (9)$$

Аналогічно, для задачі вимушених пружних коливань система (4) набуває вигляд

$$(K - \Omega^2 M) q^a = R^a, \quad (10)$$

де:

$(K - \Omega^2 M)$ – глобальна матриця «динамічної жорсткості»;

R^a – вектор вузлових сил, що визначається за амплітудними значеннями поверхневого навантаження p^a ;

q^a – вектор амплітудних значень узагальнених координат у вузлах оболонки.

Система Коші (8) інтегрується методом Рунге-Кутта-Мерсона з автоматичним вибором величини кроку. При цьому значення вектору деформацій повзучості ϵ при підрахуванні правої частини (7) на кожній ітерації є постійним. Процес ітерацій при підрахуванні правої частини (8) за схемою метода Рунге-Кутта-Мерсона закінчується за умови

$$\max((q_j^{(i+1)} - q_j^{(i)}) / q_j^{(i)}) \leq e, j=1..6(N+1), \quad (9)$$

де

e – точність, прийнята в розрахунках.

Початкові умови при $y(0)=0$ для задачі (8) визначаються розв'язком (7), відповідно до крайової задачі пружного деформування та задачі (10), відповідно до вимушених коливань.

У третьому розділі надані алгоритми й чисельні методи та результати, що одержані за дослідженнями з достовірності розрахункового методу й програмного забезпечення для ПЕОМ.

Метод розв'язування початково-крайової задачі базується на поєднанні методів продовження розв'язку у часі за схемою методу Рунге-Кутта-Мерсона з автоматичним вибором кроку, й розв'язування на кожному кроці в часі скінченно-елементної крайової задачі, з застосуванням ітераційної схеми методу Ньютон-Канторовича для лінеаризації нелінійного відносно вектору узагальнених координат розв'язувального рівняння. У чисельній реалізації використано метод квадратур Гауса для інтегрування по об'єму оболонки при обчислюванні елементів матриць жорсткості, мас та компонентів вектору навантажень, що визначаються за температурними й незворотними деформаціями повзучості.

З метою реалізації запропонованої методики розроблено пакет прикладних програм, що складається з трьох незалежних частин: програма для розрахунку на динамічну повзучість; програма для визначення власних частот і форм

вільних коливань; програма для графічного відображення результатів. Для розв'язування задач термоповзучості (7) та вимушених коливань (10) обрано модифікацію фронтального методу. Для розв'язування СЛАР, до якої зводиться задача на вимушені коливання, використано метод Гауса. При аналізі вільних коливань оболонки, однорідні рівняння виду (10) заздалегідь із допомогою трикутної факторизації матриці мас за схемою Холецького приводилась до стандартної форми повної проблеми власних значень, яка розв'язувалась за методом Якобі.

З метою отримання даних з достовірності розрахункового методу й програмного забезпечення для ПЕОМ розв'язано низку тестових прикладів. Деякі з них надано на рис. 1-4.

а)

б)

Рис.1. Поперечний згин пластини: а) дані роботи – —, дані Мяченкова зі співавторами – маркери, б) збіжність розрахунку за кількістю ітерацій для різних q

а)

б)

Рис.2. Повзучість пластини: дані роботи --, дані Галішина – маркери; 1 - геометрично лінійна (ГЛ) задача, 2 – геометрично нелінійна (ГН) задача; а) зміна прогину в часі; б) – зміна моменту M_{ss} на зовнішньому контурі в часі

Рис.3. Повзучість пластини: а) дані роботи --, дані Галішина – маркери 1 – ГЛ задача, 2 – ГН задача;

Рис.4. Розтяг циліндра при повзучості: дані роботи – маркери, експериментальні дані --

Надано розрахункові дані з аналізу пружності й коливань, статичної та динамічної повзучості пластин і оболонок щодо їхнього геометрично лінійного і нелінійного згину, вільних та вимушених коливань, які співставленні з відомими в літературі чисельними й експериментальними результатами, які було отримано іншими авторами. Співставлення результатів показало добру узгодженість розв'язків окремих задач, які одержано на основі запропонованого методу та іншими авторами, що свідчить про прийнятність розробленого у роботі методу розрахунку для оцінювання міцності й довговічності тонкостінних оболонок елементів машин за умов статичної та динамічної повзучості.

У **четвертому розділі** розглянуто результати досліджень прикладних задач аналізу міцності та довговічності оболонок елементів конструкцій. У першому підрозділі надано розв'язок задачі раціонального проектування за співставленням оцінок з термоміцності при зміні геометричної конфігурації розмежувальної стінки камери виводу пучків заряджених частинок пристрою для водоочищення. З аналізу напружено-деформованого стану розмежувальної стінки камери виводу електронних і протонних пучків з прискорювача в атмосферу впли-

ває, що при даному рівні навантаження і перепаду температури рівень інтенсивності напружень для розмежувальної стінки у формі пластини є на порядки більшим ніж у сферичному куполі. Отже, слід надати перевагу варіанту розмежувальної стінки у вигляді сферичного куполу.

За отриманими даними зроблено наступні висновки:

- вуглець-вуглецеві композитні матеріали (ВВКМ) можуть використовуватися для створення вікон виведення заряджених часток із прискорювача більшого розміру. Ці вікна призначені для променів високої (МВт) і середньої потужності (КВт) з силою струму у декілька амперів.

- уперше надано обґрунтування раціонального проектування вікна виводу, виготовленого з ВВКМ, за рахунок співставлення параметру термоміцності при виборі геометричних параметрів розмежувальної стінки вакуумної камери пристрою для водоочищення.

- за одержаними даними надано рекомендації щодо подальшого розвитку прискорювачів для систем, призначених для стерилізації більших обсягів води (тисячі м³ у день).

Далі у другому підрозділі на новій теоретичній основі визначено вплив вібраційної складової навантаження на довговічність за оцінками з формоутворення, пошкоджуваності і часу до руйнування внаслідок повзучості для пластинчастих та оболонкових елементів конструкцій. Виявлено і досліджено загальні закономірності квазістатичної і динамічної поведінки фізично нелінійних тонкостінних осесиметричних оболонок й пластин, широко поширених елементів конструкцій, які знаходяться під спільною дією зовнішнього тиску зі сталюю і гармонічно змінюваною складовими.

Розглянуто задачі для оболонок з різною кривизною твірної й пластин (труби, корпуси, днища тощо).

Для порівняння наведемо дані розрахунків оболонок з жорстко закріпленими краями, розрахункові схеми яких наведено на рис.5, які відрізняються тим, що твірна однієї має підйом величиною $0.1R$ та радіус кривизни твірної R_1 на рис. 5. Оболонки мають $R=0.08\text{м}$, $L=0.2\text{м}$, $h=0.001\text{м}$ та виготовлені з титанового сплаву Ti6Al2Cr2Mo2 , що при $T=673\text{ К}$ має наступні характеристики: $E=102\text{ ГПа}$, $n=0.3$; $B=1.363\cdot 10^{-24}\text{ МПа}^{-n}/\text{год}$, $A=1.08\cdot 10^{-20}\text{ МПа}^{-k}/\text{год}$, $r=1$, $b=0$, $n=m=6.8$; $k=p=5.79$, $c=4400\text{ кг}\cdot\text{м}^{-3}$. Розглянуто оболонки під дією внутрішнього тиску $p=p_0+p_a\sin 2pft$, де $p_0=10\text{ МПа}$, $p_a=2\text{ МПа}$, $f=100\text{ Гц}$. Вимушена частота нижча за першу власну частоту оболонок.

Окремі розрахункові дані з динамічної повзучості ($A=0.2$, $f=100\text{ Гц}$) наведено на рис. 6-8. Розрахункові дані за моделлю геометричної нелінійності ($\Gamma\text{Н} - e\tilde{\langle}0$) для циліндричної оболонки показано штриховими кривими з маркерами для $t=0$ і суцільною кривою з маркерами для t_* ($u_{*}=0.9$), та для оболонки з кривою твірною штриховими кривими для $t=0$ і суцільними кривими для t_*

($u_* = 0.9$). Дані оболонки з кривою твірною, що отримано за моделлю ГЛ - $e^{\sim} = 0$, надано суцільною жирною кривою для t_* ($u_* = 0.9$).

**Рис.5. Розрахункові схеми: I – циліндр,
II – оболонка ненульової кривизни**

Рис.6. Прогини оболонок у часі

Рис.7. Розподіл інтенсивності напружень на внутрішніх поверхнях оболонок

Рис.8. Розподіл параметру пошкоджуваності на внутрішніх поверхнях оболонок

На цих рисунках надані структури розподілів по об'єму оболонки з трансформацією у часі прогинів, пошкодження й інтенсивності напружень на внутрішній поверхні оболонок. Час до руйнування оболонки II виявився дещо більшим ніж оболонки I і становив: у випадку статичної повзучості – 271.9 годин, у випадку динамічної повзучості з частотою осцилюючого навантаження $f = 100$ Гц – 209.5 годин.

Як це видно з рис. 7, в момент, що передує руйнуванню, інтенсивність напруження поблизу закріплення значно відрізняється від тих значень, що мають місце в початковий момент часу. Розподіл в початковий момент часу для обох оболонок нетотожний, що можна встановити з графіків, між тим ці дані стають тотожними в момент руйнування, тому криві розподілу інтенсивності напружень для двох оболонок в цей час практично збігаються.

Як це видно з рис. 8, розподіл параметру пошкоджуваності на внутрішній поверхні оболонок в момент, коли його максимальне значення $u_{\max} = 0.9$, виявився для двох оболонок майже однаковим, за виключенням центральної частини оболонок, де у випуклої оболонки параметр пошкоджуваності набуває дещо вищих значень.

Для динамічної повзучості встановлено, що процеси повзучості супроводжуються більш інтенсивним ніж при статичній повзучості перерозподілом в об'ємі елементу у часі полів напружень, незворотним формоутворенням із суттєвими непружними деформаціями, пошкодженням внаслідок повзучості із помітним скороченням часу до завершення прихованого руйнування. Структура розподілів механічних польових величин в цілому визначається рівнем тиску й розподілом коефіцієнту асиметрії циклу напружень, які визначаються амплітудним значенням напружень відповідної форми вимушених коливань. Накопичення у часі непружних деформацій повзучості залежить від рівня прогинів при врахуванні геометричної нелінійності, та призводить до суттєвої трансформації розподілу напружень і непружних деформацій, особливо при високих значеннях коефіцієнту асиметрії циклу напружень. В зонах з великими значеннями коефіцієнту асиметрії циклу напружень швидкість деформацій повзучості підвищуються, а напруження суттєво релаксують. При вивченні поведінки харак-

теристик напружено-деформованого стану в часі встановлено, що навіть при прогинах, які значно перевищують товщину конструкційного оболонкового елемента, переміщення і повні деформації змінюються в часі майже за квазістаціонарним законом, тоді як напруження і непружні деформації значною мірою залежать від амплітудних значень напружень відповідної форми вимушених коливань.

У п'ятому розділі було розглянуто окремі прикладні задачі, які розв'язують при проектуванні технологічних процесів гарячого формоутворення, одного з перспективних технологічних процесів. До основних переваг високотемпературного формоутворення деталей відносять: порівняно невелике деформує зусилля, що дозволяє знизити потужності устаткування й ощадливо використати виробничі площі й енергію, одержувати великогабаритні деталі, штампування яких у звичайних умовах неможливе внаслідок недостатньої потужності устаткування; можливість одержати деталі з незначною анізотропією механічних властивостей і поліпшеною структурою металу; зниження опору матеріалу до деформування без руйнування з більшими відносними обтисненнями й ряд інших. На відміну від існуючого процесу гарячого формоутворення при статичній повзучості, в розділі розглянуто додавання незначного осцилюючого навантаження.

Схему вільного пневмоформування під дією рівномірного тиску газу листа заготовки, що шарнірно закріплений на фланці спеціального штампу, представлено на рис. 9. Для прикладу наведемо розрахункові дані за технологією гарячого формоутворення обичайки з круглої заготовки з алюмінієвого сплаву Д16АТ при температурі 300°C з параметрами: $R=0.2$ м, $h=0.01$ м при постійній складовій тиску $p_0=0.12$ МПа. Амплітудне значення осцилюючої складової тиску $p_a=0.5p_0$. Частота $f=25$ Гц, що менше першої власної частоти заготовки.

Розрахункові дані гарячого формоутворення за умов статичної та динамічної повзучості ($A=0.5$) за різні проміжки часу, що необхідні для досягнення тождних рівнів підйому обичайки над планом, який приймемо рівним одній товщині (0.01 м), показано на рис. 10-12.

Для розглянутої заготовки на рис. 10: тонкі криві відповідають вихідному пружному деформуванню заготовки ($t=0$), суцільна крива – для динамічної повзучості, а крива з маркерами – для статичної повзучості, відповідно для підйому обичайки над планом. На рис. 11, 12 – штрихова крива відповідає динамічній повзучості при $A=0.5$, а суцільна крива – статичній повзучості.

Рис. 10. Формоутворення заготовки

Рис. 9. Плоска заготовка**Рис. 11. Зміна прогину****Рис. 12. Зміна деформації повзучості**

В розділі розглянуто окремі дослідження з вивчення впливу рівнів тиску та амплітуди асиметрії циклу навантаження, товщини заготовки на змінювання напруженого стану та формоутворення, пошкоджуваність та витрати часу на процеси виготовлення виробу. З рис. 11, 12 видно, що процес формоутворення та накопичення незворотних деформацій повзучості при динамічній повзучості протікає значно інтенсивніше, що прискорює термін процесу гарячого формоутворення, а додавання навіть незначного осцилюючого навантаження у порівнянні з дією статично прикладеного тиску прискорює процес формоутворення й виробу заданої форми можна отримати за менший час, ніж за статичної повзучості при однакових рівнях основного навантаження. Порівняно невелике деформуюче зусилля вже дозволяє знизити потужності устаткування й ощадливо витратити енергію, що в цілому свідчить про ефективність технології гарячого формоутворення при динамічній повзучості.

ВИСНОВКИ

Дисертаційна робота присвячена розв'язанню науково-практичної задачі щодо розробки розрахункового методу оцінювання короткочасної міцності та довговічності осесиметричних оболонкових елементів конструкцій, що деформуються при комбінованому статичному й циклічному навантаженні. Найбільш важливі наукові та практичні результати дисертаційної роботи містять наступне:

1. Надано розвиток методу розрахунків міцності й довговічності в динаміці та міцності машин за рахунок створення нового розрахункового методу оцінювання міцності й довговічності тонкостінних оболонкових елементів машин за умов статичної та динамічної повзучості.

2. Запропоновано загальну та скінченно-елементну постановки задач статичної й динамічної повзучості оболонкових елементів машин при осесиметричному геометрично нелінійному деформуванні з незворотнім формоутворенням і пошкоджуваністю з урахуванням поперечного зсуву, на базі яких створені розрахунковий метод і програмне забезпечення для оцінювання короткочасної міцності, формоутворення й довговічності тонкостінних оболонок.

3. Здійснені дослідження з достовірності розрахункового методу й програмного забезпечення для оцінювання міцності й довговічності тонкостінних оболонкових елементів машин за умов статичної та динамічної повзучості, які містять добре узгоджені дані співставлення розв'язків окремих задач, які одержано на основі запропонованого методу та іншими авторами.

4. Одержано розв'язок прикладної задачі раціонального проектування при зміні геометричної конфігурації розмежувальної стінки камери виводу пучків заряджених частинок пристрою для водоочищення за співставленням оцінок з термоміцності.

5. На новій теоретичній основі визначено вплив вібраційної складової навантаження на довговічність, формоутворення, пошкоджуваність і час до завершення прихованого руйнування внаслідок повзучості для пластинчастих та оболонкових конструкційних елементів.

6. Отримано нові результати щодо технологічного процесу формоутворення оболонкових елементів конструкцій при обробці заготовок тиском з додаванням осцилюючої складової на підставі дослідження з впливу вібраційної складової тиску на гаряче формоутворення плоских та оболонкових заготовок.

7. Результати досліджень, висновки та рекомендації щодо проектування розмежувальної стінки вакуумної камери пристрою для водоочищення пучками заряджених частинок використано в Інституті плазмової електроніки та нових методів прискорення Національного Наукового Центру "Харківський фізико-технічний інститут".

СПИСОК ПРАЦЬ, ОПУБЛІКОВАНИХ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Морачковский О.К., Замула А.А. Исследование ползучести стержней и оболочек на базе МКЭ и сдвиговой теории // Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут». – Харків: НТУ «ХПІ», 2002.– № 10, Т.2 – С. 86-90

Здобувач отримав розв'язок задачі осьового розтягування циліндричної оболонки.

2. Морачковський О.К., Замула О.О. Розв'язання задач динамічної повзучості тонких оболонок // Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут». – Харків: НТУ «ХПІ», 2004. – № 19. – С. 149-152

Здобувач розробив метод і алгоритм щодо розв'язування задач динамічної повзучості осесиметричних оболонок.

3. Морачковський О.К., Замула О.О. Метод розв'язування задач повзучості геометрично нелінійних оболонок обертання // Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут». – Харків: НТУ «ХПІ», 2004. – № 31. – С. 123-127

Здобувачем розроблено метод щодо розв'язування задач повзучості осесиметричних оболонок при прогинах, порівнянних з товщиною.

4. Замула О.О. Урахування геометричної нелінійності у розрахунках на повзучість тонкостінних елементів конструкцій // Вісник Національного тех-

нічного університету «Харківський політехнічний інститут». – Харків: НТУ «ХПІ», 2005. – № 47. – С. 77-83

Здобувач отримав дані розв'язку задачі геометрично нелінійного деформування при повзучості тонкостінної циліндричної оболонки.

5. Бірюков О.В., Ковпик О.Ф., Корнілов Є.О., Саєнко С.Ю., Морачковський О.К., Замула О.О. Аналіз міцності розмежувальної стінки камери виводу пучків заряджених частинок з прискорювача в атмосферу // Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут». – Харків: НТУ «ХПІ», 2006. – № 32. – С. 23-27

Здобувач виконав чисельні розрахунки термоміцності розмежувальної стінки камери для обробки води електронними й протонними пучками.

6. Замула А.А., Мельтюхов М.В. Расчет двухслойных оболочек и пластин при нелинейном деформировании // Вісник Інженерної Академії України. – К., 2000. – Спеціальний випуск. С. 391-394.

Здобувач виконав чисельні розрахунки двошарових конічних оболонок при прогинах, порівнянних з товщиною.

7. Бірюков О.В., Замула А.А. Моделирование прочности стенок вакуумных камер из композитных материалов // Вісник Інженерної Академії України. – К., 2001. – ч. 2, № 3.– С. 25-27

Здобувач розробив алгоритм і програми щодо розв'язування задач короткочасної міцності тонкостінної оболонки вакуумної камери при геометрично нелінійному деформуванні.

8. Морачковський О.К., Замула О.О. Розв'язування задач згину оболонок з поперечним зсувом при повзучості // Труды 8-й Международной конференции «Физические и компьютерные технологии в народном хозяйстве». — Харків: ХНПК «ФЭД», 2003. – С. 276-278

Здобувач виконав чисельні розрахунки на повзучість круглих пластин.

9. Morachkovsky O., Sobol V., Zamula A. The methods for solution of static and dynamic creep problems for bodies of revolution // Тезиси докладов Международной конференции «Nonlinear Dynamics». – Харьков: НТУ «ХПІ», 2004. – С. 59

Здобувач отримав розв'язки задач повзучості оболонок обертання.

АНОТАЦІЇ

Замула О.О. Розрахунковий метод оцінювання довговічності при динамічній повзучості оболонкових елементів конструкцій. – Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за фахом 05.02.09 – динаміка та міцність машин. Національний технічний універ-

ситет "Харківський політехнічний інститут", Харків, 2007.

Дисертаційну роботу присвячено розв'язанню науково-практичної задачі щодо розробки розрахункового методу оцінювання короткочасної міцності та довговічності осесиметричних оболонкових елементів конструкцій, що деформуються при комбінованому статичному й циклічному навантаженні.

Запропоновано загальну та скінченно-елементну постановки задач статичної й динамічної повзучості осесиметричних оболонкових елементів машин з урахуванням поперечного зсуву, геометричної нелінійності з незворотнім формоутворенням і пошкоджуваністю, на базі яких створені розрахунковий метод і програмне забезпечення для оцінювання короткочасної міцності, формоутворення й часу до руйнування тонкостінних оболонок.

Здійснені дослідження з достовірності розрахункового методу й програмного забезпечення, які містять добре узгоджені дані співставлення розв'язків окремих задач, одержаних на основі запропонованого методу та іншими авторами;

Одержано розв'язок прикладної задачі раціонального проектування при зміні геометричної конфігурації розмежувальної стінки камери виводу пучків заряджених частинок пристрою для водоочищення за співставленням оцінок з термоміцності. На новій теоретичній основі визначено вплив вібраційної складової навантаження на довговічність, формоутворення, пошкоджуваність і час до завершення прихованого руйнування внаслідок повзучості для пластинчастих та оболонкових конструкційних елементів. Отримано нові результати щодо технологічного процесу гарячого формоутворення оболонкових елементів конструкцій при обробці заготовок тиском з додаванням осцилюючої складової.

Результати досліджень, висновки та рекомендації щодо проектування розмежувальної стінки вакуумної камери пристрою для водоочищення пучками заряджених частинок використано в Інституті плазмової електроніки та нових методів прискорення Національного Наукового Центру "Харківський фізико-технічний інститут".

Ключові слова: Конструкційна міцність, довговічність, термоміцність, динамічна повзучість, пошкодження, час до руйнування, оболонкові елементи конструкцій, гаряче формоутворення оболонок.

Замула А.А. Расчетный метод оценки долговечности при динамической ползучести оболочечных элементов конструкций. – Рукопись.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.02.09 – динамика и прочность машин. Национальный технический университет "Харьковский политехнический институт", Харьков, 2007.

Диссертационная работа посвящена решению научно-практической задачи разработки расчетного метода оценивания кратковременной прочности и долговечности осесимметричных оболочечных элементов конструкций, деформирующихся при комбинированном статическом и циклическом нагружении.

Предложена общая и конечно-элементная постановки задач статической и динамической ползучести осесимметричных оболочечных элементов машин с учетом поперечного сдвига, геометрической нелинейности с необратимым формообразованием и повреждаемостью, на базе которых создан расчетный метод и программное обеспечение для оценивания кратковременной прочности, формообразования и времени до разрушения тонкостенных оболочек.

Подробно рассмотрены способы реализации основных этапов расчета. Для рассмотрения процесса ползучести в предложенном методе используется схема пошагового продолжения во времени по параметру вектора, составленного из деформаций ползучести и параметра повреждаемости с помощью численного интегрирования уравнений состояния методом Рунге-Кутты-Мерсона. Представлен способ решения задачи на вынужденные колебания, вывод разрешающей системы уравнений и ее линеаризации методом Ньютона-Канторовича. Представлены результаты исследования по достоверности расчетного метода и программного обеспечения, которые содержат хорошо согласованные данные сопоставления решений отдельных задач, которые получены на основе предложенного метода и другими авторами.

Получено решение прикладной задачи рационального проектирования при изменении геометрической конфигурации разграничительной стенки камеры вывода пучков заряженных частиц устройства для водоочистки по данным сопоставления оценок термопрочности.

На новой теоретической основе определено влияние вибрационной составляющей нагрузки на долговечность, формообразование, повреждаемость и время до завершения скрытого разрушения вследствие ползучести для пластинчатых и оболочечных конструктивных элементов. Получено новые результаты для разработки технологического процесса горячего формообразования оболочек при обработке заготовок давлением с добавлением вибрационной составляющей давления.

Результаты исследований, выводы и рекомендации по проектированию разграничительной стенки вакуумной камеры устройства для водоочистки пучками заряженных частиц использованы в Институте плазмовой электроники и новых методов ускорения Национального Научного Центра "Харьковский физико-технический институт".

Установлены новые количественные и качественные закономерности динамической ползучести, а также влияние геометрической нелинейности и по-

вреждаемости на оценки длительной прочности пластинчатых и оболочечных элементов энергетического оборудования (трубы, крышки, днища и другое).

Ключевые слова: Конструкционная прочность, долговечность, термopрочность, динамическая ползучесть, повреждаемость, время до разрушения, оболочечные элементы конструкций, горячее формoобразование оболочек.

Zamula O.O. Calculation method of life-time estimations by dynamic creep of the shell elements of the construction. – Manuscript.

Thesis for a candidate of technical sciences degree by the speciality 05.02.09 – dynamics and strength of machines. National Technical University "Kharkov Polytechnical Institute", Kharkiv, 2007.

Dissertation is devoted to the solution of a scientific-practical problem of development of a computation method of estimation of short-time strength and life-time of axisymmetric shells elements of the constructions under a combined static and cyclic loading.

It is offered blanket and finite element statements of problems of a static and dynamic creep damage axisymmetric shells elements of machines taking into account the cross section shear, geometrical nonlinearity with irreversible shaping on the basis of which the computation method and the software for appreciate short-time strength is created, shaping and creep-rupture life of thin-walled shells.

The research on reliability of the computation method and the software which contain well concerted comparisons of solutions of separate problems which it is received on the basis of the offered method and other authors are carried out;

The solution of an applied problem of rational designing is received at change of a geometrical configuration of a differentiating wall of the chamber of the charged particles beam extraction devices for water purification by comparison of thermo-strength estimations. On a new theoretical basis influence of a vibration loading on longevity, shaping, damageability and creep-rupture life of shells constructive elements is determined.

New results for hot shaping of the shells constructive elements are received at processing preparations by pressure with addition of an oscillating component.

The results of examinations, deductions and recommendations for designing the differentiating wall of the charged particle extraction device for water purification are used in Institute of plasma electronics and new methods of acceleration of the National Centre of Science "The Kharkiv physicotchnical institute"

Key words: structural strength, lifetime, static and dynamic loading, creep, damage, creep-rupture life, shell elements of constructions, hot shaping.

Замула Олексій Олександрович

**РОЗРАХУНКОВИЙ МЕТОД ОЦІНЮВАННЯ ДОВГОВІЧНОСТІ
ПРИ ДИНАМІЧНІЙ ПОВЗУЧОСТІ
ОБОЛОНКОВИХ ЕЛЕМЕНТІВ КОНСТРУКЦІЙ**

АВТОРЕФЕРАТ

Відповідальний за випуск: к.т.н, доц. Ю.В. Ромашов

Підписано до друку 2007 р. Формат видання 145x215.
Формат паперу 60×90/16. Папір офсетн. Друк-ризографія.
Обсяг 0,9 авт. арк. Наклад 100 прим. Замовлення №

Надруковано СПДФО Ізрайлев Є.М.
Свідоцтво №04058841Ф0050331 від 21.03.2001 р.
61024, м.Харків, вул.. Гуданова, 4/10
