

ЗМІСТ

ВСТУП	19
--------------------	----

РОЗДІЛ 1

АНАЛІТИЧНИЙ ОГЛЯД СУЧАСНОГО СТАНУ ПРОБЛЕМИ.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧ ДОСЛІДЖЕННЯ МІЦНОСТІ

ОБОЛОНКОВИХ КОНСТРУКЦІЙ НЕОДНОРІДНОЇ СТРУКТУРИ 23 |

1.1 Методи чисельного моделювання оболонкових конструкцій складної конфігурації	26
1.2 Особливості дослідження напружено-деформованого стану багатошарових оболонкових конструкцій	27
1.3 До визначення пружних сталих сучасних композиційних матеріалів	44
1.4 Висновки	45

РОЗДІЛ 2

НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНИЙ СТАН ОБОЛОНОК РКТ СКЛАДНОЇ КОНФІГУРАЦІЇ ПРИ КОМБІНОВАНОМУ

СТАТИЧНОМУ НАВАНТАЖЕННІ 47 |

2.1 Підхід до аналізу напружено-деформованого стану оболонкових конструкцій РКТ на основі теорії Тимошенко-Міндліна	47
2.2 Програмне забезпечення розрахунку напружено-деформованого стану оболонок складної конфігурації. Застосування бібліотеки «QFEMLIB»	51
2.2.1 Тривимірний приклад (нелінійна статика)	53
2.2.2 Вихідний формат опису скінченно-елементної моделі	54

2.3 Оцінка напружено-деформованого стану міжступеневого відсіку тришарової конструкції з вуглепластика за результатами розрахунків перед проведенням випробувань	56
2.4 Випробування на розрахункові випадки «Транспортування» і «Політ ракети-носія на АУТ»	64
2.5 Розрахунок міжступеневого відсіку на основі комплексу MSC NASTRAN. Порівняння з результатами експерименту	69
2.6 Статичні випробування міжступеневого відсіку з алюмінієвого сплаву	73
2.7 Висновки	80

РОЗДІЛ 3

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ МІЖСТУПЕНЕВОГО ВІДСІКУ З АЛЮМІНІЄВОГО СПЛАВУ ПРИ ОСЬОВОМУ СТИСКАННІ

3.1 Опис експериментальної установки. Результати випробувань	85
3.2 Чисельний аналіз напружено-деформованого стану міжступеневого відсіку з алюмінієвого сплаву. Порівняння розрахунків з результатами проведених статичних випробувань	90
3.3 Висновки	92

РОЗДІЛ 4

РОЗРАХУНОК МІЦНОСТІ ПАЛИВНОГО БАКУ ТРЕТЬОЇ СТУПЕНІ ПРИ ДІЇ МАКСИМАЛЬНОГО ВНУТРІШНЬОГО ТИСКУ

4.1 Чисельний аналіз напружено-деформованого стану паливного бака третього рівня в САПР QFEM	93
4.2 Чисельний аналіз напружено-деформованого стану паливного бака третьої ступені в MSC.Nastran	98
4.3 Результати статичних випробувань паливного бака третьої ступені	103
4.4 Висновки	106

РОЗДІЛ 5	
СУЧАСНІ ПІДХОДИ ДО РОЗВ'ЯЗАННЯ ЗАДАЧ СТІЙКОСТІ ПІДКРІПЛЕНИХ ОБОЛОНКОВИХ КОНСТРУКЦІЙ	108
5.1 Методи та програмне забезпечення дослідження напружено-деформованого стану силових оболонкових конструкцій аерокосмічної техніки	109
5.2 Сучасні підходи і методи розрахунку на стійкість до локальних і загальних форм випинання неоднорідних оболонкових систем при простому і комбінованому навантаженні	112
5.3 Висновки	119

РОЗДІЛ 6	
МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ДЛЯ ПРОВЕДЕННЯ ЧИСЕЛЬНОГО АНАЛІЗУ НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНОГО СТАНУ КОРПУСУ ДВИГУНА РАКЕТИ-НОСІЯ В ПРОЦЕСІ ЙОГО НАВАНТАЖЕННЯ ЗРОСТАЮЧИМ ВНУТРІШНІМ ТИСКОМ ДО РУЙНУВАННЯ	121
6.1 Постановка задачі. Основні співвідношення для розрахунку НДС оболонки змінної геометрії меридіана	122
6.2 Алгоритм та методика розрахунку	127
6.3 Тестовий приклад розрахунку руйнівного навантаження	129
6.4 Обґрунтування достовірності результатів	135
6.5 Висновки	136

РОЗДІЛ 7	
СКІНЧЕННО-ЕЛЕМЕНТНИЙ ПІДХІД ДО РОЗРАХУНКУ НДС ТА РУЙНІВНОГО НАВАНТАЖЕННЯ ПАЛИВНИХ БАКІВ РАКЕТИ-НОСІЯ ПРИ НАЯВНОСТІ ТРІЩИНИ У НАЙБІЛЬШ НАПРУЖЕНІЙ ДІЛЯНЦІ КОНСТРУКЦІЇ	138
7.1 Метод розрахунку руйнівних навантажень ребристих баків ракети-носія із тріщиною у найбільш напруженій зоні	139

7.2 Чисельний підхід до аналізу руйнування	141
7.3 Чисельний аналіз коефіцієнтів інтенсивності напружень	148
7.4 Висновок	149

РОЗДІЛ 8

СТІЙКІСТЬ ДИСКРЕТНО ПІДКРІПЛЕНИХ ПРОМІЖНИМИ ШПАНГОУТАМИ СКЛАДЕНИХ ОБОЛОНКОВИХ КОНСТРУКЦІЙ ТИПУ «ЦИЛІНДР-КОНУС» ПРИ КОМБІНОВАНОМУ СТАТИЧНОМУ НАВАНТАЖЕННІ

8.1 Постановка задачі стійкості складеної оболонкової конструкції із стінками постійної товщини типу «циліндр-конус»	151
8.2 Матриця перетворення напружено-деформованого стану підкріпленого шпангоутами кінцевого відсіку зі стінками постійної товщини	155
8.3 Характеристичне рівняння для визначення критичних навантажень оболонкової конструкції зі стінками постійної товщини	159
8.4 Результати чисельної реалізації методики розрахунку стійкості складеної оболонкової конструкції типу «циліндр-конус»	161
8.5 Задача стійкості складеної підкріпленої оболонкової конструкції типу «циліндр-конус» з кінчними відсіками лінійно-змінної товщини	164
8.6 Висновки	174

РОЗДІЛ 9

ОСНОВНІ ДИФЕРЕНЦІАЛЬНІ РІВНЯННЯ І ЧИСЕЛЬНИЙ РОЗВ'ЯЗОК ЗАДАЧІ СТІЙКОСТІ ПІДКРІПЛЕНИХ ОБОЛОНКОВИХ КОНСТРУКЦІЙ ТИПУ «БОЧКА-ОЖИВАЛО»

9.1 Постановка задачі стійкості складеної оболонкової конструкції. Застосовані гіпотези	177
--	-----

9.2 Основні розв’язувальні рівняння стійкості складеної оболонки: випадок всебічного нормального зовнішнього тиску	185
9.3 Основні розв’язувальні рівняння стійкості складеної оболонки: випадок комбінованого навантаження всебічним нормальним зовнішнім тиском і осьовим стискаючим зусиллям	191
9.4 Метод розв’язання основних рівнянь стійкості оболонки типу «бочка-оживало»	194
9.5 Формулювання граничних умов	195
9.6 Умови спряження відсіків конструкції через шпангоут	196
9.7 Модифікація системи різницевих рівнянь при сполученні «оживальної» і «бочкоподібної» секцій	198
9.8 Приклад застосування запропонованого підходу. Аналіз і достовірність чисельних результатів	199
9.9 Висновки	212
ВИСНОВКИ	214
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	216
ДОДАТКИ	241

АНОТАЦІЯ

Монографію присвячено новим аналітико-чисельним підходам і дослідженню напружено-деформованого стану з визначенням руйнівних навантажень оболонкових конструкцій ракетно-космічної техніки (РКТ) у екстремальних умовах експлуатації. Надійне математичне забезпечення, особливо передвипробувальне моделювання нової техніки, має високий статус у зв'язку з можливістю значного полегшення корпусних силових елементів ракети-носія, зокрема міжступеневих відсіків, головного обтічника і розгінного блоку, а також зниженням, у ряді випадків, натурних повторних випробувань за умови забезпечення поглибленого аналізу на міцність. Практичне використання методу скінченних елементів з обчислювальної точки зору вимагає значних обсягів пам'яті та процесорного часу. Отже, одним з найбільш актуальних напрямків дослідження є розробка і реалізація паралельних версій відповідних обчислювальних методів. При цьому важливим є представлення результатів розрахунків з урахуванням наочності інтерфейсу користувача. Розробка методів геометричного моделювання є самостійною проблемою з точки зору практичного застосування методу скінченних елементів у практиці РКТ.

Обговорюється програмне забезпечення з використанням скінченно-елементної моделі визначення напружено-деформованого стану оболонкових конструкцій складної геометричної конфігурації, що дозволяє знизити вимоги до обчислювальних ресурсів. Аналізується напружено-деформований стан оболонок РКТ складної конфігурації при комплексному впливі статичних навантажень,

зокрема надається оцінка напружено-деформованого стану міжступеневого відсіку тришарової конструкції з вуглепластика за результатами розрахунків перед проведенням випробувань. Придільена увага особливостям математичного моделювання силових оболонкових конструкцій складної конфігурації на базі скінченно-елементних моделей в розрахункових програмних комплексах з аналізом впливу характеру армування матеріалу на напружено-деформований стан і здатність нести експлуатаційне навантаження. На базі геометричного моделювання та методу скінченних елементів запропоновано програмне забезпечення для візуалізації розподілу напружень і деформацій у досліджуваній конструкції з метою визначення можливих зон руйнування.

Наведено аналіз результатів експериментального дослідження конструкції міжступеневого відсіку з алюмінієвого сплаву, визначення його несучої здатності під дією осьової стискаючої сили і надано порівняння результатів випробувань з результатами проведених розрахунків методом скінченних елементів. Результати розрахункової оцінки міцності міжступеневого відсіку з алюмінієвого сплаву для випадку навантаження максимальною осьовою стискаючою силою довели, що розрахункове руйнівне навантаження у достатній мірі корелюється із випробувальним руйнівним навантаженням. Наведені дані дозволили зробити висновок про достатню якість та кількісну збіжність розрахункових даних і значень зусиль, отриманих при випробуваннях міжступеневого відсіку з алюмінієвого сплаву, що підтверджує достовірність результатів чисельного розрахунку на базі запропонованого підходу. При цьому розроблено експериментальну методiku і проведено спрямовані випробування реальних конструкцій при навантаженні, наближених до експлуатаційних. Дослідження напружено-деформованого стану на базі запропонованих чисельних підходів з подальшим експериментальним дослідженням на фрагментах-свідках дозволили прогнозувати граничний стан конструкцій розрахунковими методами.

Проведено порівняння картини руйнування паливного бака при статичних випробуваннях з результатами розрахунків. Розрахунки проведено також методом скінченних елементів за допомогою програмного комплексу MSC.Nastran. Враховано геометричну та фізичну нелінійності корпусу паливного бака. Розрахунки та експериментальні результати показали досить високу кореляцію.

Запропоновано метод дослідження напружено-деформованого стану корпусу двигуна ракети-носія з урахуванням пружно-пластичного деформування матеріалу, а також підкріпленого баку при наявності тріщини у найбільш напруженій зоні.

З використанням методу початкових параметрів у матричній формі із застосуванням асимптотичних методів і методу скінченних різниць запропоновано підхід до розв'язку задач стійкості складених підкріплених оболонкових конструкцій з урахуванням дискретного розташування проміжних шпангоутів при комбінованому зовнішньому навантаженні.

Запропоновано математичну модель деформування шпангоутних оболонок типу «циліндр-конус» з урахуванням жорсткості проміжних шпангоутів з площини початкової кривизни і обговорюється чисельний аналіз для різних типів і геометрії конструкцій. Надається алгоритм побудови граничних поверхонь, які відокремлюють область стійкості конструкцій від області нестійкості при комбінованому навантаженні.

Аналізується стійкість підкріпленої складеної оболонкової конструкції позитивної гауссової кривизни серединної поверхні типу «бочка-оживало» при дії рівномірного зовнішнього навантаження і осьових стискаючих зусиль. Запропоновані основні диференціальні рівняння пружної стійкості, що дозволяють на базі аналітико-чисельного розрахунку оцінити вплив параметру кривизни меридіана відсіків, параметрів жорсткості і характеру розташування підкріплюючих елементів за осьовою координатою на величину критичних зусиль і характер поведінки. Обговорю-

ється запропонований алгоритм визначення раціональних параметрів геометрії та жорсткості досліджуваної системи з точки зору забезпечення рівної стійкості до локальних і загальних форм випинання в залежності від умов обпирання конструкції.

Особлива увага приділена механічним ефектам, які зумовлені особливостями геометричної форми досліджуваних конструкцій РКТ, властивостями матеріалу та характером зовнішнього навантаження.

Запропоновані підходи дозволяють з високою мірою вірогідності прогнозувати несучу здатність, статичні руйнівні навантаження оболонки обертання складної конфігурації в умовах, наближених до експлуатаційних.

У монографії наведені результати дослідження наступних задач:

- з використанням просторових скінченних елементів і оболонкових ефектів створено підхід визначення напружено-деформованого стану паливних баків двох модифікацій – у вигляді комбінації циліндричної оболонки і двох півсфер і у вигляді комбінації півсфери та зворотного конуса на основі теорії Міндліна;
- запропоновано фізичну модель деформації перехідного відсіку і паливних баків, що враховує зміну механічних характеристик матеріалу в результаті переходу в пластичний стан під дією силових навантажень, яка реалізована у вигляді ітераційного процесу, згідно з яким нелінійна задача зводиться до вирішення послідовності лінійних задач;
- отримала розвиток фізична модель деформування паливних баків складної конфігурації, що враховує, зокрема, вплив температурних навантажень;
- на основі аналізу візуалізації полів деформацій і напружень оболонки складної геометричної форми та цільового експериментального дослідження виявлено зони найбільш вірогідного руйнування конструкції;
- досліджено вплив крайових ефектів, обумовлених наявністю в конструкції підкріплюючих шпангоутів;

– запропоновано математичну модель і методику чисельного дослідження напружено-деформованого стану та міцності силової оболонкової конструкції, зокрема двигуна РН, в процесі навантаження зростаючим внутрішнім тиском з урахуванням процесів пружно-пластичного деформування;

– запропоновано методику і досліджено інтенсивність напруження у підкріпленому паливному баку ракетonoсія при наявності тріщини у місці знаходження максимального напруження;

– з використанням методу початкових параметрів у матричній формі із застосуванням асимптотичних методів запропоновано підхід до розв'язку задач стійкості оболонкових конструкцій складної геометричної конфігурації з урахуванням дискретного розташування проміжних шпангоутів;

– досліджено процес деформування та проведено чисельний аналіз- критичних зусиль шпангоутних оболонок типу «циліндр-конус» і «бочка-оживало» з урахуванням жорсткості проміжних шпангоутів з площини початкової кривизни;

– доведена ефективність конструкції типу «бочка-оживало» по відношенню до сприйняття комбінованого зовнішнього навантаження з точки зору стійкості первісної форми за локальними і загальними формами випинання.

Практичне значення отриманих результатів полягає в аналізі напружено-деформованого стану оболонкових конструкцій ракетно-космічної техніки на основі запропонованих підходів і відповідного програмного забезпечення з урахуванням особливостей геометричної форми і характеру зовнішнього навантаження; відпрацьована методика експериментального визначення руйнівних деформацій конструкцій РКТ на фрагментах-свідках, що дозволяє прогнозувати напружено-деформований стан оболонкових конструкцій складної конфігурації з композиційних матеріалів при екстремальних умовах експлуатації розрахунковими методами без проведення дорогого і тривалого натурального експе-

риментального випробування; запропоновано підхід та алгоритм розрахунку стійкості складених оболонкових конструкцій РКТ на основі аналітико-чисельних підходів і відповідного програмного забезпечення з урахуванням особливостей геометричної форми, жорсткості підкріплюючих елементів і характеру комбінованого зовнішнього вантаження.

Ключові слова: математична модель, елемент тонкостінної конструкції, процес пружно-пластичного деформування, оболонка обертання, критерії міцності, руйнівне навантаження, магістральна тріщина, коефіцієнт інтенсивності напружень, математична модель, оболонкові системи складної конфігурації, чисельні методи, метод початкових параметрів у матричній формі, сингулярні диференціальні рівняння із змінними коефіцієнтами, гібридні асимптотичні методи, локальні та загальні форми випинання, критичні зусилля, раціональні характеристики жорсткості.