

**НАЦІОНАЛЬНА АКАДЕМІЯ НАУК УКРАЇНИ
ІНСТИТУТ ПРОБЛЕМ МАШИНОБУДУВАННЯ
ІМ. А. М. ПІДГОРНОГО**

ДЕГТЯРЬОВ Кирило Георгійович

УДК 629.76 + 534.1

**СТАТИЧНІ ТА ДИНАМІЧНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ ЕЛЕМЕНТІВ
КОНСТРУКЦІЙ РАКЕТНОЇ ТЕХНІКИ З УРАХУВАННЯМ ЯВИЩ
ГІДРОПРУЖНОСТІ ТА ПЛАСТИЧНОСТІ**

05.02.09 – динаміка та міцність машин

АВТОРЕФЕРАТ
дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Харків – 2021

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана в Інституті проблем машинобудування ім. А. М. Підгорного Національної академії наук України та в Національному технічному університеті «Харківський політехнічний інститут», м. Харків.

Науковий керівник доктор технічних наук, професор
Стрельнікова Олена Олександрівна,
Інститут проблем машинобудування
ім. А.М. Підгорного НАН України,
провідний науковий співробітник відділу
гідроаеропружності енергетичних машин

Офіційні опоненти: академік Академії наук вищої школи України,
доктор технічних наук, професор,
Львов Геннадій Іванович,
Національний технічний університет «ХПІ»,
професор кафедри «Динаміка та міцність машин

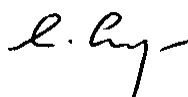
кандидат технічних наук,
Акімов Дмитро Васильович
Державне підприємство «Конструкторське бюро
«Південне» ім. М.К. Янгеля»
керівник сектору відділу міцності, навантажень та
динамічних випробувань

Захист відбудеться “05” травня 2021 р. о 16 годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 64.180.01 в Інституті проблем машинобудування ім. А.М. Підгорного НАН України за адресою: 61046, м. Харків-46, вул. Пожарського, 2/10.

З дисертацією можна ознайомитися у бібліотеці Інституту проблем машинобудування ім. А.М. Підгорного НАН України за адресою: 61046, м. Харків-46, вул. Пожарського, 2/10.

Автореферат розісланий “5” квітня 2021 року.

Учений секретар спеціалізованої
вченої ради Д 64.180.01
доктор технічних наук, професор



О. О. Стрельнікова

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Проектування нових машинобудівних конструкцій з покращеними експлуатаційними характеристиками є актуальною проблемою сьогодення. Це вимагає ретельного аналізу міцносних та динамічних характеристик як окремих вузлів та елементів, так і конструкції в цілому. Проведення натурного експерименту є коштовною і не завжди безпечною процедурою. Тому на теперішній час поширеними стають комп'ютерні експерименти, які дозволяють провести велику кількість віртуальних випробувань та на їх основі обрати оптимальний варіант конструктивного елементу.

Актуальність теми.

У різних галузях інженерної практики, таких як авіабудування, хімічна промисловість, вітроенергетика, транспорт, енергетичне машинобудування та ракетна техніка широко застосовуються елементи тонкостінних конструкцій, що функціонують в умовах підвищених технологічних навантажень і мають відсіки, частково заповнені легкозаймистими або отруйними рідинами.

Оцінка стану існуючого обладнання, проектування нових високоефективних машин і споруд з необхідним рівнем надійності, вимагає визначення механічного стану та міцносних характеристик їх елементів. Ці дані дозволяють оцінити межу міцності конструкції при інтенсивних силових навантаженнях, зробити відстроювання від небажаних резонансних частот, виявити ще на стадії проектування найбільш небезпечні з точки зору концентрації напружень зони. Специфікою багатьох таких конструкцій є їх робота при взаємодії з водним середовищем. Внаслідок цього для визначення цих міцносних характеристик необхідно розв'язувати задачі гідропружності, тобто визначати поля напружень, деформацій, а також частоти коливань, виходячи з того, що на пружне тіло діють сили тиску з боку рідини або газу.

Тому стає актуальним побудова уточнених моделей і методів розрахунку конструкцій, що враховують складну геометрію, вплив рідини або газу на напружено-деформований стан конструктивних елементів, частоти і форми їх власних коливань, можливість появи пластичних деформацій, які можуть спричинити небажане деформування, динамічну нестійкість конструкцій, та призвести до передчасного руйнування як окремих елементів, так і конструкції в цілому.

Створення нових методів і математичних моделей для дослідження оболонок та оболонкових конструкцій ракетної техніки з урахуванням явищ гідро-пружності та пластичності дозволить розробити комп'ютерне забезпечення, яке дасть змогу оцінювати міцносні та динамічні характеристики обладнання шляхом віртуального експерименту. Застосування розроблених методів до розв'язання прикладних задач з визначення міцності, руйнівних навантажень, та відстроювання від резонансних частот є актуальною практичною задачею, що і обумовило тему даної дисертаційної роботи.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Основні задачі були розв'язані здобувачем як виконавцем комплексних тем науково-

технічних досліджень Інституту проблем машинобудування ім. А.М. Підгорного НАН України, а саме:

- за держбюджетними науково-дослідними темами № 0111U001758 (Ш-67-16) «Аналіз та поліпшення динамічних міцнісних властивостей елементів перспективних енергетичних машин та ракетно-космічної техніки під дією навантажень різної фізичної природи», № ДР 0112U002490 «Розробка нових методів та засобів діагностування енергетичних машин та підвищення їх міцності та працездатності», ДЗ-71-2019 «Розроблення програмного забезпечення для аналізу динаміки та міцності корпусних композитних елементів з наноармуванням», № ДР 0111U001758 «Розробка наукових основ аналізу нестационарного динамічного напруженого стану елементів енергетичного та іншого обладнання з урахуванням пошкоджень»,

– за договором про міжнародне співробітництво між Інститутом проблем машинобудування ім. А.М. Підгорного НАН України та Вессекським технологічним інститутом, Велика Британія (2014-2021 рр.),

– за господарськими договорами з ДП «КБ «Південне» ім. М. К. Янгеля» «Розробка методів і програм розрахунку динамічного напруженого і граничного стану оболонкових конструкцій при високошвидкісних діях» (2015 р., № SCM YZH SP 03900), «Розробка методів і програм розрахунку тривалості руйнування елементів кріплення БЕ при імпульсному навантаженні (2016 р., № GR2 YZH SPS 25900), «Перевірка працездатності і механічного стану систем кріплення БЕ при транспортуванні на основі комп'ютерного моделювання технологічних і експлуатаційних впливів» (2017 р., № ДР 0117U003630), № ДР 0114U003588 «Розрахункова оцінка вібрацій елементів аерокосмічних систем при силових та аеродинамічних навантаженнях», № ДР 0120U101241 «Підвищення ефективності елементів конструкцій ракетно-космічної техніки шляхом їх чисельного моделювання та оптимізації», № ДР 0117U000880 «Динамічна міцність елементів аерокосмічної та бронетанкової техніки під дією механічних навантажень»,

- за грантом МОН України «Сучасні обчислювальні методи для аналізу плескань в паливних баках з перегородками» в рамках спільних українсько-індійських проектів (2019-2021 рр.)

Мета і задачі дослідження. *Метою дисертаційної роботи є розроблення ефективних методів для аналізу міцносних та динамічних характеристик та руйнівних навантажень елементів тонкостінних конструкцій ракетно-космічної техніки при врахуванні ефектів пружності, пластичності, гідропружної взаємодії, плескань заповнювача в відсіках.*

Для досягнення зазначеної мети в роботі були сформульовані та розв'язані такі основні наукові та прикладні *задачі*: розробити й обґрунтувати загальний підхід до моделювання пружно-пластичного деформування елементів конструкцій, який дозволяє враховувати реальні діаграми навантаження, знаходити руйнівні навантаження при статичних та динамічних впливах; побудувати неперервні і дискретні математичні моделі для визначення частот і форм вільних коливань системи «оболонкова конструкція - рідина» на

основі методу зважених нев'язок з подальшим застосуванням методів скінченних та граничних елементів; провести аналіз точності і збіжності запропонованих методів; дослідити достовірність результатів числових досліджень, отриманих за розробленими моделями, шляхом їх порівняння з експериментальними даними та результатами інших дослідників; застосувати розроблені математичні моделі та обчислювальні методи для розв'язання таких практичних задач: дослідити статичний та динамічний напружено-деформований стан та визначити руйнівні навантаження на сосуди високого тиску та паливні баки з урахуванням реальних діаграм навантаження за різними скінченно-елементними схемами; дослідити напружено-деформований стан циліндричної оболонки з періодичною системою отворів; надати прогноз руйнування конструктивних елементів, встановити момент часу, в який відбувається руйнування; провести серію розрахунків конструкції паливного баку другого ступеня ракети-носія для визначення власних частот конструкції та плескань вільної поверхні рідини за різні умови експлуатації з метою відстроювання від резонансних частот.

Об'єкт дослідження – процеси деформування оболонкових систем з урахуванням явищ пластичності та гідропружності.

Предмет дослідження – міцносні, динамічні характеристики та руйнівні навантаження елементів оболонкових конструкцій.

Методи дослідження. Для розв'язання сформульованих задач використовувалися класичні методи й моделі механіки суцільного середовища. Дискретизація розв'язувальних співвідношень для аналізу деформування досліджуваних елементів конструкцій здійснювалася на основі методів скінченних та граничних елементів. Числові дослідження методом скінченних елементів здійснювалися у середовищі програмного комплексу ANSYS, у якому створювалися тривимірні комп'ютерні моделі елементів конструкцій, також був створений оригінальний програмний код, що реалізує метод граничних елементів.

Наукова новизна одержаних результатів полягає в такому:

розроблено нові розрахункові моделі, засновані на методах скінченних та граничних елементів, для розрахунку напружено-деформованого стану елементів оболонкових конструкцій ракетної техніки та руйнівних навантажень з урахуванням реальної діаграми навантаження, ефектів пластичності, гідропружної взаємодії з урахуванням явища плескань;

вперше досліджено руйнівні навантаження та визначено момент появи тріщин в перфорованих оболонкових конструкціях з циклічною системою отворів в умовах інтенсивного короткочасного навантаження з урахуванням пластичності;

вперше визначені частоти і форми коливань оболонки, що складається з двох відсіків, частково заповнених стисливою в'язкою рідиною, при одночасному врахуванні пружності стінок, плескань рідини, змінних рівнів гравітації та заповнення оболонки.

Практичне значення одержаних результатів. Одержані в дисертації результати можуть бути використані під час проектування та при експлуатації аерокосмічних та машинобудівних конструкцій. Створені в роботі математичні моделі, методи та числові алгоритми становлять розрахункову базу для аналізу напружено-деформованого стану, гідропружних коливань та визначення руйнівних навантажень на елементи конструкцій під впливом інтенсивних силових навантажень.

Ряд результатів та рекомендацій прикладних досліджень дисертаційній роботі надіслано до ДП «КБ «Південне» ім. М. К. Янгеля».

Особистий внесок здобувача у роботи, опубліковані у співавторстві.

Дисертаційна робота є результатом завершених наукових досліджень автора, які було виконано в Національному технічному університеті «ХПІ та Інституті проблем машинобудування ім. А.М. Підгорного НАН України в період з 2013 по 2020 роки.

Основні результати теоретичних та розрахункових досліджень, що виносяться на захист, отримано самостійно.

У роботах, що написані у співавторстві, особистий внесок здобувача полягає у наступному: [1, 13–15] – проведено тестові розрахунки та надано аналіз отриманих результатів, прийнято участь у постановці задач та формулюванні висновків; [11-12, 16–17] – проведено числовий аналіз елементів конструкцій та отримані руйнівні навантаження [2, 4-7, 18-20] – розроблено розрахункові методики визначення нестационарного напружено-деформованого стану та проведено розрахунки; [3, 8-10, 21] – запропоновано розрахункові моделі, здійснено числові розрахунки.

Апробація результатів дисертації. Основні результати досліджень доповідалися та дістали схвалення на міжнародних конференціях, симпозиумах і наукових семінарах: XV Міжнародній науково-технічній конференції МКММ-2014, присвяченій 160-річчю з дня народження Анрі Пуанкаре (Херсон, 2014); XXXVII, XXXVIII, XLI, XLII International Conference on Boundary Elements and other Mesh Reduction Methods (United Kingdom 2014, 2015, 2018, 2019); XVII, XVIII Міжнародних симпозиумах «Методи дискретних особливостей в задачах математичної фізики» (МДОЗМФ – Харків, 2015, 2017); V, VII Міжнародних конференціях «Космические технологии: настоящее и будущее» (Дніпро, 2015, 2019); I, II Міжнародних науково-технічних конференціях «Динаміка, міцність та моделювання в машинобудуванні» (Харків, 2018, 2020).

У повному обсязі дисертація доповідалася на засіданні науково-технічної проблемної ради «Математичне моделювання. Механіка деформівного твердого тіла. Динаміка та міцність машин» Інституту проблем машинобудування ім. А. М. Підгорного НАН України під керівництвом члена-кореспондента НАН України Ю. Г. Стояна.

Публікації. Матеріали дисертації опубліковані в 21 науковій роботі, серед яких 6 індексуються у базі SCOPUS, 16 статей у наукових виданнях України та іноземних держав, та 5 публікацій у матеріалах міжнародних конференцій і симпозиумів.

Структура та обсяг дисертацій. Дисертація складається зі вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних джерел з 121 найменування на 13 сторінках та 2 додатків на 9 сторінках, а також містить 69 рисунків та 22 таблиці. Загальний обсяг роботи складає 135 сторінок, включаючи 110 сторінок основного тексту.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі обґрунтована актуальність дисертаційної роботи, сформульовані мета і задачі досліджень, викладені основні отримані результати, зазначені їх наукова новизна та практичне значення, наведені відомості про публікації, особистий внесок автора та апробацію роботи.

Перший розділ містить огляд літературних джерел та аналіз сучасного стану теоретичних, числових та експериментальних досліджень НДС елементів конструкцій під впливом інтенсивних силових механічних навантажень, а також досліджень стосовно гідропружної взаємодії.

Основні результати з визначення статичних, динамічних характеристик та руйнівних навантажень на елементи конструкцій за значеними напрямками досліджень містяться в роботах таких провідних вчених як Аврамов К.В., Акімов Д.В., Баженов В.Г., Вольмір А.С., Воробйов Ю.С., Галін М.П., Галішин О.З., Гембара О.В., Григоренко Я.М., Гузь О.М., Гудрамович В.С., Дзюба А.П., Зеленцов Д.Г., Ільюшин О.А., Іваницький Я.Л., Кантор Б.Я., Кліменко Д.В., Кубенко В.Д., Курпа Л.В., Львов Г.І., Можаровський Н.С., Морачковський О.К., Махненко О.В., Михаськів В.В., Писаренко Г.С., Савула Я.Г., Сіренко В.М., Сметанкіна Н.В., Степанов Г.В., Ткачук М.М., Угрімов С.В., Філіппов А.П., Харченко В.В., Шевченко В.П., Шевченко Ю.М., Шульженко М.Г., Шупіков О.М., Янютін Є.Г., Bathe K.J., Clifton R.J., Cowper G., Dong_An., Dowell E.H., Meyers M.A., Nowacki W., Symonds P. та ін.

Проаналізовано також результати досліджень з питань взаємодії пружних конструкцій з рідиною, та відмічений значний внесок таких відомих науковців, як Башлій І.Д., Богомаз Г.И., Гаврилюк І.П., Гладких В.Ф., Зенкевич О., Колесніков К.С., Кубенко В.Д., Лимарченко О.С., Луковський І.А., Моїсеєв Н.Н., Моссаковський В.І., Микишев Г.Н., Нариманов Г.С., Ніколаєв О.Д., Оден Дж., Постнов В.А., Пилипенко В.В., Стрельнікова О.О., Стренг Г., Тимоха О.М., Харахурим И.Я., Abramson H.N., Bauer H.F., Ibragim R., Miles J, Henderson D. та ін.

На основі аналізу літературних джерел обґрунтовано актуальність теми дисертаційної роботи та необхідність проведення досліджень, яким присвячені подальші розділи.

У другому розділі досліджено задачі визначення частот і форм коливань елементів конструкцій з урахуванням гідропружної взаємодії. Зазначається, що для опису руху як пружної конструкції, так і рідини використовуються основні співвідношення механіки суцільного середовища. Всі моделі суцільного середовища передбачають визначення полів напружень σ_{ij} , деформацій ϵ_{ij} ,

переміщень u_j , а також температури T , тиску p та густини ρ в залежності від часу. Для знаходження цих полів застосовують рівняння руху в напруженнях, співвідношення Коші для малих деформацій, умови сумісності деформацій, граничні та початкові умови, рівняння стану, що пов'язують тиск, густину та температуру середовища.

Вказаних співвідношень недостатньо для однозначного визначення σ_{ij} , ε_{ij} , u_j ($i, j=1,2,3$). Тому використовують співвідношення між напруженнями та деформаціями, або між напруженнями та швидкостями деформацій. В цьому розділі розглянуто взаємодію пружного тіла (компоненти тензорів напружень є лінійними функціями від компонентів деформацій) та рідини (компоненти тензора напружень зв'язані з компонентами тензору швидкостей деформацій).

Вважаємо, що процес деформування є ізотермічним, густина пружного тіла є сталою. Зв'язок між деформаціями та напруженнями описується законом Гука. Нехай на пружне тіло, що займає область Ω з границею Γ , діють задані об'ємні та поверхневі сили. Крім того, частина поверхні тіла Γ_i контактує з рідиною; на частині межі Γ_1 задані переміщення тіла \mathbf{u}^e , а на частині Γ_2 - зусилля; $\Gamma=\Gamma_1\cup\Gamma_2$. Задаються також початкові умови.

З урахуванням закону Гука рівняння руху в переміщеннях мають вигляд

$$\mu\Delta u_j^e + (\lambda + \mu)\frac{\partial \vartheta^e}{\partial x_j} + X_j = \rho\frac{\partial^2 u_j^e}{\partial t^2}, \quad \vartheta^e = \operatorname{div}\mathbf{u}^e = \frac{\partial u_1^e}{\partial x_1} + \frac{\partial u_2^e}{\partial x_2} + \frac{\partial u_3^e}{\partial x_3} \quad j=1,2,3, \quad (1)$$

де λ , μ – коефіцієнти Ляме.

Для розв'язання рівнянь руху (1) застосовуємо метод зважених нев'язок. Невідомі подаємо у вигляді рядів за базисом із фінітних функцій $\{\psi_n\}_{n=1}^{N_1}$; як пробні використовуємо функції з цього ж базису. Після інтегрування отриманого співвідношення за об'ємом та зведення частки об'ємних інтегралів до поверхневих отримуємо скінченно-елементне формулювання зазначеної задачі у вигляді

$$[M_S]\ddot{\mathbf{u}}^e + [C_S]\dot{\mathbf{u}}^e + [K_S]\mathbf{u}^e = \{\mathbf{f}_S\} + \{\mathbf{f}_{pr}\}, \quad (2)$$

де $[M_S]$, $[C_S]$, $[K_S]$ – матриці мас, демпфування та жорсткості, відповідно, $\{\mathbf{f}_S\}$ – вектор заданих зусиль, що діють на пружне тіло, $\{\mathbf{f}_{pr}\}$ – вектор зусиль, що характеризують тиск рідини на змочені поверхні пружного тіла. Для визначення вектору $\{\mathbf{f}_{pr}\}$ перейдемо до формулювання початково-крайової задачі з механіки рідини. Для опису рідини використовуємо рівняння руху у напруженнях з додаванням зв'язку між напруженнями та швидкостями деформацій. Вважаємо, що рідина є стисливою, та в'язкою. Припускаємо, що збурення тиску рідини внаслідок руху пружного тіла є малими, тобто розв'язуємо зв'язану задачу в лінійному формулюванні. Використовуємо закони збереження маси та імпульсу з об'ємними силами \mathbf{b}

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} = -\operatorname{div}(\rho\mathbf{V}_f) + Q, \quad \rho\frac{d\mathbf{V}_f}{dt} = \rho\mathbf{b} + \operatorname{div}(\boldsymbol{\sigma}_f), \quad (3)$$

де \mathbf{V}_f – вектор швидкості, ρ – густина рідини, Q – джерела, t – час.

Для визначення компонент тензору напружень приймаємо гіпотезу Стокса та рівняння стану у вигляді

$$\boldsymbol{\sigma}_f = -\left(p + \frac{2}{3}\mu\right)\mathbf{I} + \dot{\mathbf{S}}, \quad p = p(\rho), \quad \frac{\partial p}{\partial \rho} = c^2, \quad (4)$$

де $\dot{\mathbf{S}}$ - девіатор швидкостей деформації, c – швидкість звуку в середовищі.

З (3) маємо наближені рівності

$$\operatorname{div} \mathbf{V}_f = -\frac{1}{\rho_0 c^2} \frac{\partial p}{\partial t} + \frac{Q}{\rho_0}, \quad \frac{\partial \mathbf{V}_f}{\partial t} = -\frac{1}{\rho_0} \nabla p + \frac{\mu}{3\rho_0} \nabla \operatorname{div} \mathbf{V}_f + \frac{\mu}{\rho_0} \Delta \mathbf{V}_f.$$

Тут ρ_0 - середнє значення густини рідини, відносно якого відбувається лінеаризація. За припущенням відсутності джерел та масових сил отримуємо хвильове рівняння в акустичному наближенні

$$\frac{1}{\rho_0 c^2} \frac{\partial^2 p}{\partial t^2} = \frac{1}{\rho_0} \operatorname{div} (\nabla p) + \frac{4\mu}{3\rho_0^2 c^2} \operatorname{div} \left[\nabla \left(\frac{\partial p}{\partial t} \right) \right] = 0. \quad (5)$$

Дискретизацію рівняння (5) здійснюємо за допомогою метода скінченних елементів з використанням методу зважених нев'язок. Отримуємо

$$\begin{aligned} \iiint_{\Omega_f} \frac{1}{\rho_0 c^2} w \frac{\partial^2 p}{\partial t^2} d\Omega_f + \iiint_{\Omega_f} \nabla w \cdot \left(\frac{4\mu}{3\rho_0^2 c^2} \nabla \frac{\partial p}{\partial t} \right) d\Omega_f + \iiint_{\Omega_f} \nabla w \cdot \left(\frac{1}{\rho_0} \nabla p \right) d\Omega_f = \\ = - \iint_{\Gamma_f} w \mathbf{n} \cdot \frac{\partial^2 \mathbf{u}_f}{\partial t^2} d\Gamma_f. \end{aligned} \quad (6)$$

Будуємо скінченно-елементні апроксимації для тиску та переміщень у вигляді

$$p = \{N\} \{p_f\}, \quad \mathbf{u} = \{N^u\} \{u_f\}, \quad (7)$$

де $p = \{N\}, \{N^u\}, \{p_f\}, \{u_f\}$ - функції форми для тиску, переміщень та відповідні вузлові значення невідомих. Приходимо до скінченно-елементного формулювання задачі

$$[\mathbf{M}_f] \{\ddot{p}_f\} + [\mathbf{C}_f] \{\dot{p}_f\} + [\mathbf{K}_f] \{p_f\} + \rho_0 [\mathbf{R}]^T \{\ddot{u}_f\} = 0,$$

де $[\mathbf{M}_f], [\mathbf{C}_f], [\mathbf{K}_f]$ - матриці мас, демпфування та жорсткості, відповідно, $[\mathbf{R}]$ - акустична гранична матриця, яка обчислюється за формулою

$$[\mathbf{R}]^T = \iint_{\Gamma_f} \{N\} \{\mathbf{n}\}^T \{N^u\}^T d\Gamma_f.$$

Переходимо до зв'язаної задачі гідро-пружної взаємодії. На змоченій поверхні будемо мати

$$\boldsymbol{\sigma}_s \mathbf{n} + p \mathbf{n} = 0, \quad n u_s = n u_f. \quad (8)$$

На вільній поверхні рідини Γ_0 використовуємо динамічну та кінематичну умови, з яких отримуємо матрицю $[\mathbf{S}_f]$. Приходимо до дискретної моделі

$$\begin{bmatrix} [\mathbf{M}_s] & 0 \\ \rho_0 [\mathbf{R}] & [\mathbf{M}_f] + [\mathbf{S}_f] \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{\mathbf{u}}^e \\ \ddot{p}_f \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} [\mathbf{C}_s] & 0 \\ 0 & [\mathbf{C}_f] \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{\mathbf{u}}^e \\ \dot{p}_f \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} [\mathbf{K}_s] & -[\mathbf{R}] \\ 0 & [\mathbf{K}_f] \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \mathbf{u}^e \\ p_f \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} f_s \\ 0 \end{Bmatrix}, \quad (9)$$

що дозволяє враховувати рух вільної поверхні при розв'язанні зв'язаної задачі гідропружності в лінійному формулюванні. Метод зважених нев'язок було також застосовано до граничних умов задачі безвихрового руху нев'язкої нестисливої рідини, з використанням пробних функцій, що задовольняють рівнянню Лапласа. Це дало змогу отримати гранично-скінченно-елементне формулювання задачі. Зауважимо, що отримані при цьому диференціальні рівняння також мають форму (9), елементи матриць $[M_s], [C_s], [K_s]$ визначаються методом скінченних елементів (МСЕ), а елементи матриць $[M_f], [K_f]$ в задачі руху рідини обчислюються як сингулярні поверхневі інтеграли з використанням методу граничних елементів (МГЕ).

З метою перевірки запропонованих методів проведено тестові розрахунки. Розглянуто сферичну оболонку з перегородкою.

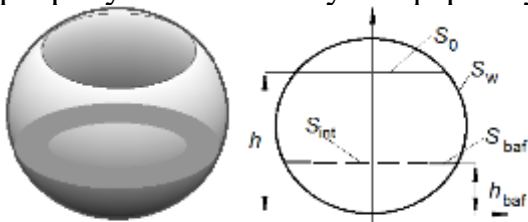


Рис. 1. Сферичний бак з внутрішньою перегородкою

Використовувались методи скінченних та граничних елементів. У разі застосування МГЕ меридіан змоченої поверхні оболонки розбивався на 200 елементів, а радіус вільної поверхні – на 150 елементів. Подвоєння кількості елементів не привело до суттєвих змін в результатах. При використанні МСЕ загальна кількість елементів становила

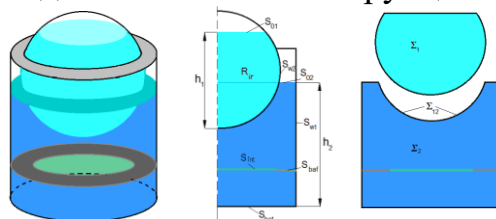
24230. У таблиці 1 наведено результати розрахунку частот в Hz за допомогою МГЕ і МСЕ, і дано порівняння з результатами роботи Faltinsen O.M., Timokha A.N. Analytically approximate natural sloshing modes for a spherical tank shape. J. Fluid Mech., **703**, pp. 391-401, 2012, де застосовано аналітичні підходи. Розглянуто першу та другу форми коливань осесиметричних коливань.

Частоти осесиметричних коливань рідини в сферичній оболонці

Таблиця 1

m	Метод	Рівень заповнення $h_1=h/R$, м				
		$h_1=0.2$	$h_1=0.6$	$h_1=1.0$	$h_1=1.8$	$h_1=1.99$
1	Faltinsen	3.8261	3.6501	3.7451	6.7641	29.0500
	МСЕ	3.8314	3.6510	3.7456	6.7646	32.2151
	МГЕ	3.8261	3.6501	3.7451	6.7645	29.1811
	Faltinsen	9.2561	7.2659	6.9763	12.1139	51.8122
2	МСЕ	9.2686	7.2659	6.9780	12.1205	53.0467
	МГЕ	9.2561	7.2660	6.9763	12.1139	52.8155

Досліджено різні рівні заповнення рідиною. Далі розглянуто резервуар з циліндричним і сферичним відсіками. Ескіз конструкції наведено на рис. 2.



здійснено МСЕ, побудову матриць для опису руху рідини виконано МГЕ. На рис. 3 показані чотири форми коливань незаповненої конструкції.

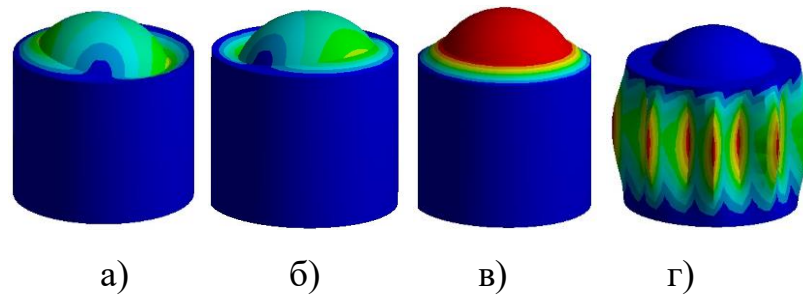


Рис. 3. Форми коливань оболонкової конструкції

Форми 3а) і 3б) відповідають кратній частоті $\Omega_1 = 4.6359$ Hz. Це найменша частота, що відповідає першій гармоніці; симетрична форма 3в) відповідає частоті $\Omega_3 = 5.9312$ Hz, яка є найменшою для нульової гармоніки, симетрична форма 3г) відповідає частоті $\Omega_4 = 50.9721$ Hz, яка є найменшою для десятої гармоніки. Найнижча частота спостерігається в сферичному відсіку при врахуванні коливань рідини. Відзначимо, що перші частоти дуже близькі за величиною. Наприклад, формам 1 - 5 відповідають частоти, що розрізняються в межах 1 Гц, але відповідні їм форми пов'язані з різними типами вібрації. Перші двадцять форм відносяться переважно до плескання.



Рис. 4. Скінченно-елементні моделі бака з двома відсіками

Отримані дані стали підґрунтям для розробки методики пошуку частот і форм вільних коливань бака ракети-носія як оболонкової конструкції з двома відсіками, частково заповненими рідиною, пошуку частот і форм незаповненої конструкції, плескань вільної поверхні рідини. Створено різні скінченно-елементні моделі конструкції в залежності від типу розрахунку, рівнів заповнення і часу польоту. Серед основних наведемо модель оболонки для пошуку частот коливань незаповненої конструкції, а також модель бака, частково заповненого рідиною, для пошуку

частот плескань і коливань конструкції з урахуванням пружності стінок. Скінченно-елементна модель для проведення модального аналізу конструкції, яка не містить рідини, побудована з гексадральних елементів. Дану модель наведено на рис. 4а). Загальна кількість скінченних елементів становила 6684 при загальній кількості вузлів, рівній 36645. Кількість елементів по ширині сектора дорівнювала 7, але розрахунки показали, що достатньо вже 5 елементів. На рис. 4б) зображено скінченно-елементну модель конструкції з відсіками, частково заповненими рідиною. Розрахунки здійснювались МСЕ з використанням рівнянь (2). Знайдено частоти та форми коливань незаповненої конструкції, частоти та форми гідропружних коливань конструкції з урахуванням різних рівнів заповнення кожного з баків, частоти і форми коливань рідини в баку.

На рис.5 подано перші форми коливань незаповненої конструкції, при чому було встановлено, що нижчими частотами є перша частота нульової гармоніки 286,1 Гц; перша частота першої гармоніки - 164,6 Гц; перша частота другої гармоніки - 268,2 Гц, перша частота десятої гармоніки - 78,7 Гц.

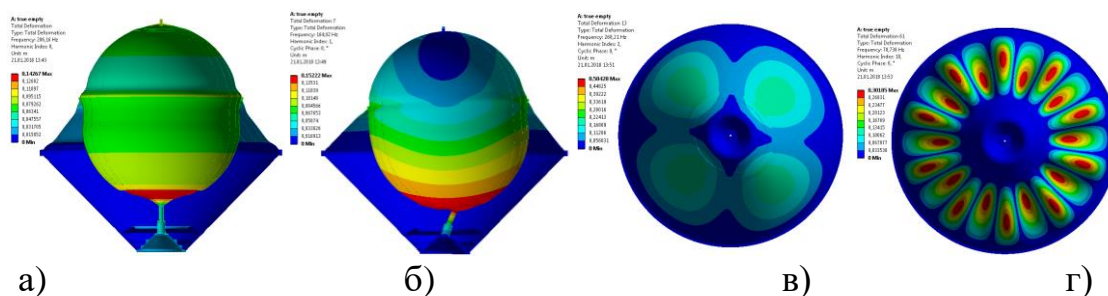


Рис. 5. Форми коливань незаповненої оболонкової системи

Зауважимо, що найнижча частота відповідає десятій гармоніці.

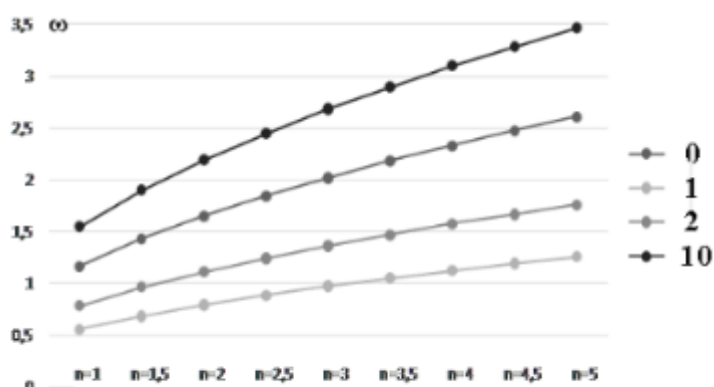


Рис. 6. Залежність частоти плескань від рівня перевантаження

Подальший аналіз був здійснений для отриманих вище частот. З результатів модального аналізу випливає, що хоча знайдені частоти досить високі, проте, в разі збільшення рівня рідини в оболонці частоти можуть значно знизитися. Проведено аналіз частот плескань. Залежність частоти плескань від рівня перевантаження конструкції при

незмінному рівні заповнення баків подано на рис. 6. Форми коливань плескань для характерних гармонік $m = 0, 1, 2, 10$ подано на рис.7.

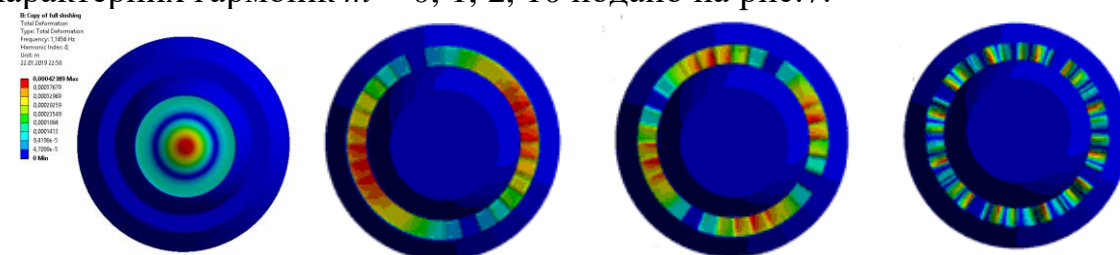


Рис. 7. Форми коливань плескань

Встановлено, що найменші частоти коливань динамічної системи «оболонка-рідина» відповідають плесканням вільної поверхні, врахування пружності стінок баків приводить до істотного зниження частот коливань в порівнянні з частотами незаповнених оболонок, при цьому найменші частоти заповнених і незаповнених оболонкових конструкцій можуть відповідати різним хвильовим числам.

В третьому розділі проведено дослідження міцності посудин тиску при одночасній дії внутрішнього тиску і стискаючої сили на кришку бака. Конструкція є оболонкою обертання, що складається з циліндричної, тороїдальної і сферичної частин. Метою досліджень було визначення

руйнівного навантаження на паливний бак. При цьому комп'ютерне віртуальне випробування відтворювало схему та методологію натурального експерименту.

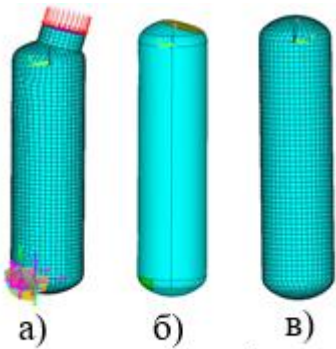


Рис. 8. Розрахункові моделі конструкції

Запропоновано різні скінченно-елементні розрахункові схеми з метою врахування конструктивних особливостей та можливості спрощення як віртуальної, так і натурної моделі бака. Проведено розрахунок оболонкової конструкції з використанням оболонкових і тривимірних скінченних елементів у тривимірному осесиметричному формулюванні з урахуванням пластичних деформацій. Досліджено руйнівне навантаження. Матеріал резервуара – сталь 25ХГСА. Характеристики

даного матеріалу: модуль пружності $E = 209$ ГПа, коефіцієнт Пуассона $\nu = 0.3$, межа плинності $\sigma_{sp} = 1080$ МПа. Проведено розрахунки для 3-х різних моделей (рис. 8а), б), в)), а саме: *модель конструкції з горловиною і кришкою*, зусилля, що діє на бак, моделюється розподіленим навантаженням по горловині бака; *модель конструкції з кришкою без горловини*, зусилля, що діє на бак моделюється розподіленим навантаженням по кришці бака і внутрішнім тиском; *спрощена модель конструкції без горловини і кришки* під дією внутрішнього надлишкового тиску.

Задачу розглянуто в пружно-пластичному формулюванні. Використовувались полі-лінійні діаграми деформування. Одну з використаних діаграм деформування подано на рис. 9.

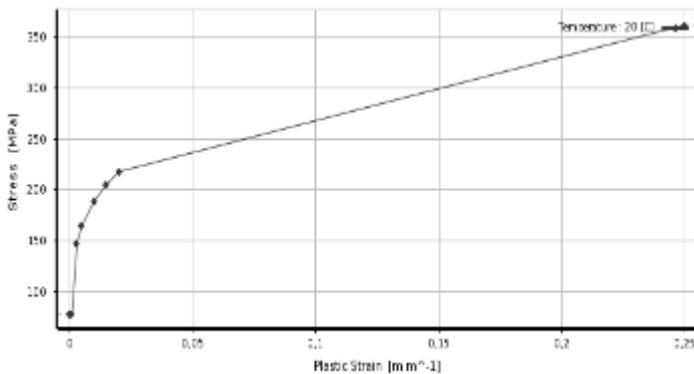


Рис. 9. Полі-лінійна діаграма розтягнення

та поверхневі сили. Потрібно визначити поля напружень, деформацій і переміщень σ_{ij} , ϵ_{ij} , u_j ($i, j = 1, 2, 3$) та невідомі заздалегідь інтенсивності повних напружень та повних деформацій в області Ω , які відповідають заданим граничним умовам та співвідношенням, що описують поведінку тіла при різних рівнях навантаження. Для знаходження зазначених функцій застосовуються рівняння руху в напруженнях, граничні та початкові умови, співвідношення Коші. Цих співвідношень недостатньо для визначення зазначених невідомих величин. Тому використовуємо фізичні рівняння, що зв'язують компоненти тензорів напружень і деформацій. Задається умова плинності, при виконанні якої виникають пластичні деформації (умова Хубера-Мізеса-Генки)

Вважаємо, що при збільшенні навантаження в тілі можуть розвиватися пластичні деформації. Застосуємо теорію малих пружно-пластичних деформацій. Формулювання задачі пружно-пластичного деформування є таким. Нехай на тіло, що займає область Ω з границею Γ , діють задані об'ємні

$$\sigma_{eq}(\mathbf{x}) = \sigma_T,$$

де σ_T - межа плинності; $\sigma_i(\mathbf{x})$ - інтенсивність повних напружень, що визначається за формулою

$$\sigma_{eq}(\mathbf{x}) = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{(\sigma_{11} - \sigma_{22})^2 + (\sigma_{22} - \sigma_{33})^2 + (\sigma_{33} - \sigma_{11})^2 + 6(\sigma_{12}^2 + \sigma_{23}^2 + \sigma_{31}^2)}.$$

Використано гіпотезу про існування єдиної кривої деформування, яка встановлює однозначну залежність між еквівалентними деформаціями ε_{eq} та еквівалентними напруженнями σ_{eq} . Задається діаграма розтягування, що характеризує зону пластичної течії.

Інтенсивність еквівалентних деформацій визначається за формулою

$$\varepsilon_{eq} = \frac{\sqrt{2}}{3} \sqrt{(\varepsilon_{11} - \varepsilon_{22})^2 + (\varepsilon_{22} - \varepsilon_{33})^2 + (\varepsilon_{33} - \varepsilon_{11})^2 + \frac{3}{2}(\varepsilon_{12}^2 + \varepsilon_{23}^2 + \varepsilon_{31}^2)}. \quad (10)$$

Між інтенсивністю еквівалентних напружень та інтенсивністю еквівалентних деформацій існує залежність, яку зазвичай будують за діаграмою розтягнення $\sigma_{eq} = \Phi(\varepsilon_{eq})$. Вважаємо, що при малих пластичних деформаціях компоненти девіатора деформацій пропорційні компонентам девіатора напружень

$$\sigma_{ij} - \delta_{ij}\sigma_0 = \frac{2}{3} \frac{\sigma_{eq}}{\varepsilon_{eq}} \varepsilon_{ij}, \quad \varepsilon_{ij} = \frac{3}{2} \frac{\varepsilon_{eq}}{\sigma_{eq}} (\sigma_{ij} - \delta_{ij}\sigma_0), \quad \sigma_0 = \frac{E}{1-2\nu} \varepsilon_0, \quad \sigma_{eq} = \Phi(\varepsilon_{eq}), \quad (11)$$

де ε_{eq} визначається за формулою (10). Повна деформація є сумою її пружної та пластичної складових за гіпотезами Прандтля-Рейса $\varepsilon = \varepsilon^e + \varepsilon^{pl}$. Внаслідок цієї рівності маємо для приращень деформацій такі співвідношення:

$$\delta \varepsilon_{ij} = \delta \varepsilon_{ij}^e + \delta \varepsilon_{ij}^{pl}.$$

Застосовуємо далі умову пропорційності компонент девіаторів

$$(\sigma_{ij} - \delta_{ij}\sigma_0) = \frac{1}{\Psi} (\varepsilon_{ij} - \delta_{ij}\varepsilon_0), \quad \frac{1}{\Psi} = 2\mu - \left(2\mu - \frac{1}{\Psi}\right), \quad \sigma_{ij} = \sigma_{ij}^e + \left(2\mu - \frac{1}{\Psi}\right) (\varepsilon_{ij} - \delta_{ij}\varepsilon_0).$$

Якщо $2\mu = 1/\Psi$, то маємо співвідношення пружної задачі. Приймаємо як нульове наближення для значення Ψ вираз $\Psi = 1/2\mu$. Після розв'язання рівнянь Ламе знаходимо відповідні нульові наближення для переміщень та деформацій $u_i^{(0)}, \varepsilon_{ij}^{(0)}$. За формулою (10) знаходимо $\varepsilon_{eq}^{(0)}$ та обчислюємо $\sigma_{eq}^{(0)}$. Після цього

отримаємо перше наближення для Ψ як $\Psi^{(1)} = \frac{3}{2} \frac{\sigma_{eq}^{(0)}}{\varepsilon_{eq}^{(0)}}$. Далі використовуємо

ітераційний процес до досягнення бажаної точності.

Для розв'язання задачі методом скінченних елементів був обраний оболонковий восьми вузловий скінченний елемент SHELL281. Розрахунки проводився для різних сіток (розмір елемента вибирався рівним 0.01; 0.005; 0.05 м). Зменшення розмірів сітки збільшило розрахунковий час, проте точність розрахунку не підвищило, а укрупнення сітки погіршило збіжність, тому був обраний оптимальний розмір елемента 0.01 м. Навантаження для всіх трьох

моделей, зображених на рис.8, визначалось таким чином: а) дія сили стиснення R - згідно табл. 2; б) одночасна дія сили стиснення R і внутрішнього надлишкового тиску P - згідно табл. 2; в) внутрішній надлишковий тиск до руйнування. Навантаження у всіх випадках відбувалося по крокам: крок відповідав 0.01 МПа та при необхідності подрібнювався. Навантаження оболонки відбувалося шляхом нарощування тиску до величини руйнівного навантаження. Це цілком відповідає схемі натурального експерименту.

Навантаження моделей тиском і силою стиску

Таблиця 2.

Етап	1	2	3	4	5	6	7
Тиск P , МПа	0	2.5	5.0	7.5	10.0	17.0	0
Сила стиснення R , Н	0	6250	12500	18750	25000	42500	0

В результаті розрахунків конструкції з горловиною, на яку діє лише сила стиснення, з'ясовано, що внесок зусиль, переданих через горловину, дуже малий. Таке зусилля не викликає пластичних деформацій, оскільки максимальні еквівалентні напруження значно менші межі текучості (рис. 10). Тому проведено розрахунок конструкції без горловини, навантаженої зусиллям на кришку і внутрішнім надлишковим тиском. З результатів видно, що основний внесок в навантаження йде від внутрішнього тиску. Незначні пластичні деформації виникають поблизу кронштейна (рис. 11). Тому будемо розраховувати конструкцію як оболонку обертання без урахування сили стиснення, навантажену внутрішнім тиском, тобто розглядати спрощену модель.

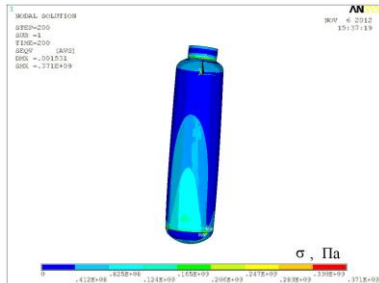


Рис. 10. Еквівалентні напруження за Мізесом

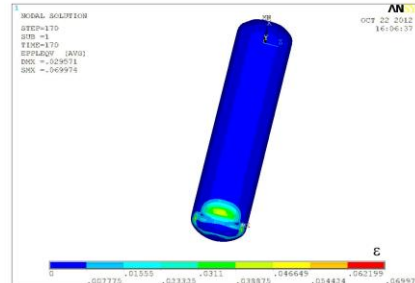


Рис. 11. Еквівалентні пластичні деформації

На рис. 12 наведено графіки, що демонструють розрахункові та експериментальні дані для окружних і меридіональних деформацій. Суцільні лінії відповідають результатам розрахунків, точки – експериментальним даним.

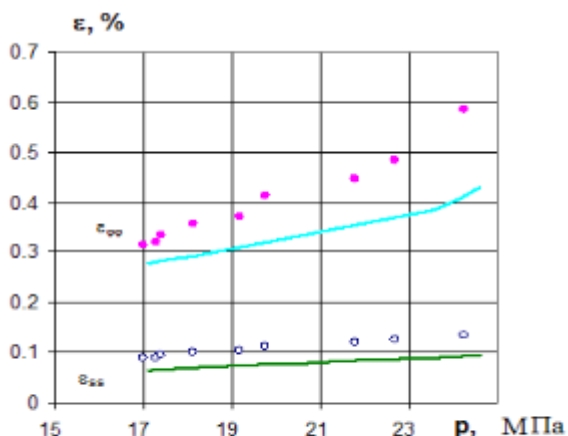


Рис. 12. Порівняння розрахункових і експериментальних даних

Суцільні лінії відповідають результатам розрахунків, точки – експериментальним даним.

За даними експерименту руйнівне навантаження складає 25 МПа, а за результатами розрахунку - 27,34 МПа. Різниця даних становить близько 10%.

Як критерій руйнування прийнятий критерій максимальної деформації. Задачу визначення руйнівного навантаження на конструкцію сформульовано і розв'язано також в тривимірному осесиметричному

формулюванні. Цей розрахунок дозволив уточнити характер НДС, особливо в зоні сполучення тороїдальної, сферичної і циліндричної частин оболонки. Для моделювання в ANSYS використано об'ємні 20-ти вузлові скінченні елементи типу Solid186. Скінченно-елементну модель розглянутої конструкції з урахуванням симетрії приведено на рис. 13.

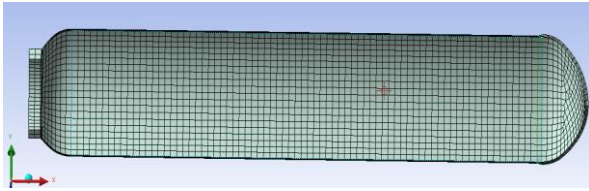


Рис. 13. Тривимірний МСЕ модель



Рис. 14. Максимальне еквівалентне напруження при тиску 27,45 МПа

Кількість елементів по товщині моделі складає 3, а вздовж меридіана - 103. Сумарна кількість елементів дорівнювала 5780. Збільшення кількості елементів (до 11500) не привело до істотної зміни результатів, що свідчить про достатню якість обраної сітки для отримання достовірних результатів. Розрахунок був закінчений за критерієм максимальної деформації в момент досягнення тиском величини 27,4568 МПа. При руйнівному тиску, рівному 27,4568 МПа, максимальне еквівалентне напруження по Мізесу склало 1055,5 МПа, і було досягнуто на внутрішній поверхні, в зоні, показаній на рис. 14. Контур недеформованого меридіана показаний на рис. 14 чорною лінією.

Відзначимо, що для оболонкової моделі використаний критерій Мізеса, а для тіла обертання – максимальної пластичної деформації. Обидва підходи дали приблизно однакове руйнівне навантаження, яке склало 27,342 МПа з використанням елементів Shell281, та 27,456 МПа з використанням елементів Solid186. Різниця результатів становить не більше 1%. Для з'ясування впливу несиметричності задача визначення руйнівного навантаження на конструкцію розв'язана в тривимірному формулюванні, з врахуванням кронштейну з жорстким закріпленням та двох патрубків з заглушками на торосферичних частинах оболонки. Результати розрахунку за уточненою тривимірною моделлю практично збігаються з результатами для спрощених моделей, несуттєво порушується лише їх симетричність з огляду на появу кронштейна. Незначна різниця в результатах свідчить про можливість використання спрощених моделей не лише при віртуальних, а й при натурних випробуваннях.

Четвертий розділ присвячено дослідженню НДС циліндричної оболонки з періодичною системою отворів. Рух оболонки здійснюється під впливом короткочасного інтенсивного силового навантаження. Запропоновано метод дослідження руйнівних навантажень при короткочасних силових впливах. Спрощену геометричну модель для розрахунку руху такої оболонки зображено на рис. 15. Теорію малих пружно-пластичних деформацій застосовуємо доти, доки пластична частина деформацій є малою в порівнянні з пружною. Далі переходимо до застосування моделі Купера – Саймондса. При цьому використовуємо зв'язок між напруженнями та швидкостями деформацій. Як критерій руйнування використовуємо залежність

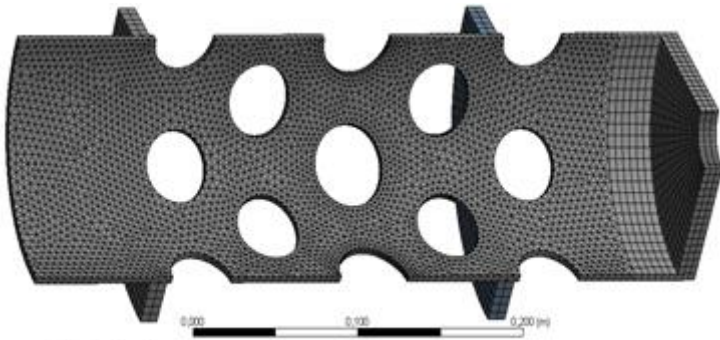


Рис. 15. Скінченно-елементна модель конструкції

$$\sigma_{eq}^d = \sigma_{eq} \left[1 + \left(\frac{\dot{\epsilon}_{eq}}{D} \right)^{\frac{1}{n}} \right], \quad (12)$$

де D, n є сталими матеріалу, інтенсивність швидкостей деформацій $\dot{\epsilon}_{eq}$ обчислена за формулою

$$\dot{\epsilon}_{eq} = \frac{\sqrt{2}}{3} \sqrt{(\dot{\epsilon}_{11} - \dot{\epsilon}_{22})^2 + (\dot{\epsilon}_{22} - \dot{\epsilon}_{33})^2 + (\dot{\epsilon}_{33} - \dot{\epsilon}_{11})^2 + 3(\dot{\epsilon}_{12}^2 + \dot{\epsilon}_{23}^2 + \dot{\epsilon}_{31}^2)}.$$

Вираз (12) є динамічною границею плинності. Рівняння (11) узагальнюються таким чином:

$$\sigma_{ij} - \delta_{ij} \sigma_0 = \frac{2}{3} \frac{\sigma_{eq}^d}{\dot{\epsilon}_{eq}} \dot{\epsilon}_{ij}, \quad \dot{\epsilon}_{ij} = \frac{3}{2} \frac{\dot{\epsilon}_{eq}}{\sigma_{eq}^d} (\sigma_{ij} - \delta_{ij} \sigma_0), \quad \sigma_{eq}^d = \Phi(\dot{\epsilon}_{eq}).$$

Знаходимо швидкості деформацій та напруження на кожному кроці за часом. Як критерій руйнування обрано критичне значення еквівалентної деформації ϵ_{dstr} . Коли еквівалентні деформації сягають свого граничного значення, матеріал конструкції вважається зруйнованим, а час, за який отримано це граничне значення, визначається як час руйнування. Створена якісна скінченно-елементна модель, використовувались 20-вузлові просторові скінченні елементи з квадратичною апроксимацією переміщень всередині елементів. Здійснено локальне подрібнення сітки навколо отворів. Фінальна скінченно-елементна модель (рис. 15) налічує понад 35 тисяч елементів. Збільшення кількості скінченних елементів вдвічі не привело до суттєвої зміни результатів. Використано полі-лінійну діаграму розтягнення (рис. 10).

Навантаження є тиском на внутрішню поверхню оболонки, включаючи один з її фланців, що викликає не тільки меридіональні напруження, але й напруження розтягу. Закріплення оболонки приймалося як жорстке защемлення за її контуром. Розглянуто НДС перфорованої оболонки зі сталі 30ХГСА. Вважається, що оболонка знаходиться під дією змінного навантаження, яке подано на рис. 16. Поява і зростання пластичної деформації починається з середини першої мілісекунди розрахунку (рис. 17). Спочатку зростання рівня пластичної деформації є несуттєвим і становить близько 3% за 1.5 мс, потім відбувається різке його прискорення.

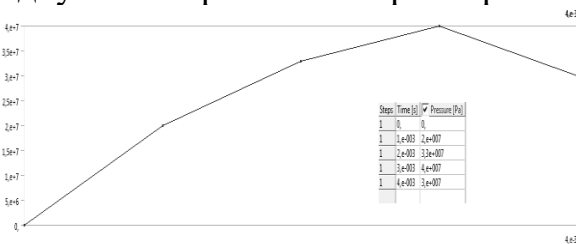


Рис. 16. Зміна навантаження за часом

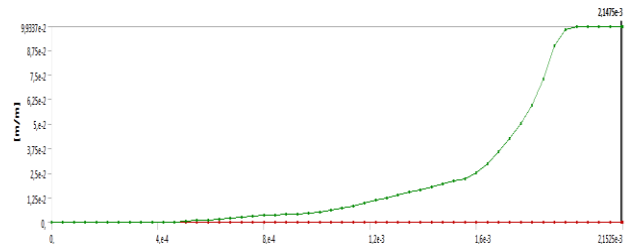


Рис. 17. Максимальні пластичні деформації

Результати розрахунків наведені на рис.17-18.

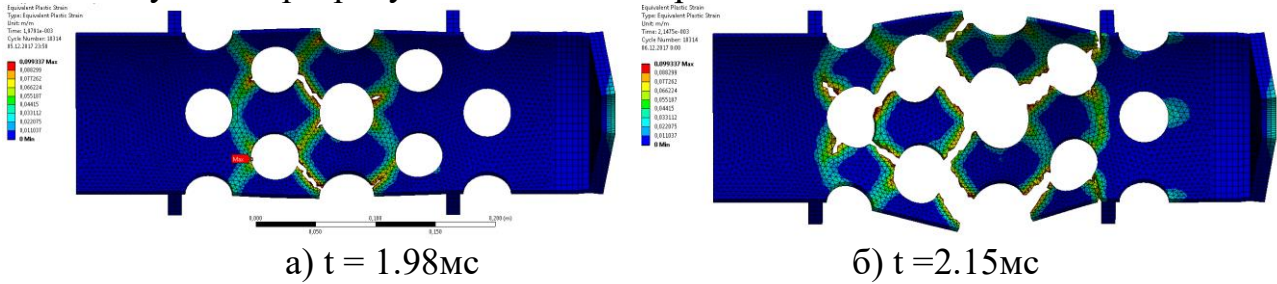


Рис. 18. Розвинення пластичних деформацій за часом.

За період між 1.5 мс і 1.98 мс відбувається різкий стрибок рівня пластичної деформації до критичного. У момент часу 1.98 мс в конструкції починаються руйнування. Зруйновані елементи відразу ж зростаються в наскрізну тріщину (рис.18а)), що призводить до повного руйнування конструкції. Первинне руйнування відбувається шляхом зрощення тріщин між 2, 3, 4 кільцями отворів, починаючи з отворів найбільшого діаметра. Незабаром, через декілька мілісекунд частина конструкції між отворів перетворюється в набір осколків різного розміру (рис 18б)). Таким чином, конструкція сталеві оболонки з товщиною стінки 4 мм не пройшла віртуального випробування і передчасно зруйнувалася. Проведено серію перевірочних розрахунків для різних моделей з кроком по товщині 0,2 мм до досягнення такої товщини, при якій конструкція витримала без руйнування весь процес навантаження. Ця товщина склала 5.4мм. Максимальні пластичні деформації, що виникають в конструкції при такій товщині, не перевищують критичні 10%, що дозволяє конструкції успішно пройти віртуальні випробування і не зруйнуватись.

ВИСНОВКИ

Дисертаційна робота присвячена вирішенню науково-практичної задачі, що полягає в створенні методів визначення руйнівних навантажень оболонкових конструкцій ракетної техніки з врахуванням пластичних деформацій матеріалу і розробці методів оцінки частот коливань баків з урахуванням ефектів гідро-пружності за різні умови експлуатації на основі методів комп'ютерного моделювання.

Найбільш важливі наукові і практичні результати роботи:

1. На основі єдиного підходу до дискретизації визначальних диференціальних рівнянь механіки суцільного середовища, заснованого на використанні методу зважених нев'язок, отримано нові розрахункові моделі, засновані на методах скінченних та граничних елементів, для опису ефектів гідропружності та пластичності при дослідженні міцносних та динамічних характеристик елементів конструкцій ракетної техніки.

2. Розроблено методику проведення віртуальних випробувань з метою визначення руйнівних навантажень на елементи конструкцій за умови статичного та динамічного навантаження, що відповідає етапам натурального експерименту.

3. Надано аналіз різних розрахункових схем для визначення руйнівного навантаження на паливний бак. Визначений вплив окремих конструктивних

елементів на НДС конструкцій та доведено, що розрахункова схема з патрубками та кронштейном може бути спрощена до оболонки обертання, коли бак підданий внутрішньому тиску та силам стиснення.

4. На основі запропонованого підходу до оцінки НДС циліндричної оболонки з періодичною системою отворів вперше досліджено руйнівні навантаження та визначено момент появи тріщин. За допомогою комп'ютерного моделювання здійснено вибір конструкції найменшої товщини, яка витримує задані інтенсивні короточасні навантаження. За цими результатами сформульовано практичні рекомендації щодо проектування вказаних елементів конструкцій підвищеної міцності.

5. Запропоновано новий метод, заснований на єдиному підході до дослідження динаміки незаповнених оболонок; визначення частот і форм коливань стисливої в'язкої рідини в жорстких оболонках; визначенню частот і форм коливань оболонки з рідиною з урахуванням та без урахування сил тяжіння.

6. Досліджено конструкцію другого ступеня ракети-носія з метою визначення власних частот конструкції та плескань вільної поверхні рідини, за різні умови експлуатації. Побудовано залежності частот від рівня гравітації в польоті першого ступеня, й залежно від часу польоту в польоті другого ступеня з урахуванням пружності стінок та різних рівнів перевантаження.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Гнисько В.И., Дегтярев К.Г., Науменко В.В., Тонконоженко А.М. Свободные и вынужденные колебания оболочек вращения, частично заполненных жидкостью. *Вісник Харківського національного університету ім. В.Н. Каразіна, серія «Математичне моделювання. Інформаційні технології. Автоматизовані системи управління»*. Харків: ХНУ, 2013. №1089. С. 39-49.
2. Гнисько В.И., Дегтярев К.Г., Тонконоженко А.М. Компьютерное моделирование разрушающей нагрузки на топливный бак. *Вісник Харківського національного університету імені В.Н. Каразіна, серія «Математичне моделювання. Інформаційні технології. Автоматизовані системи управління»*. Харків: ХНУ, 2014. Т. 24. №1105. С. 51-59.
3. Клименко Д.В., Тонконоженко А.М., Гнисько В.И., Дегтярев К.Г., Стрельникова Е.А., Внуков Е.В. Колебания жидкости в упругих оболочках с разным уровнем их заполнения. *Космическая техника. Ракетное вооружение*. 2015. №3. С. 24-29.
4. Degtyarev K.G., Gnitko V.I., Naumenko V.V., Strelnikova E.A. Free vibrations of an elastic cylindrical shell coupled with liquid sloshing. *Вісник Харківського національного університету імені В.Н. Каразіна, серія «Математичне моделювання. Інформаційні технології. Автоматизовані системи управління»*. Харків: ХНУ, 2015. Т.26. №1156. С. 63-75.
5. Degtyarev K.G., Glushich P., Gnitko V.I., Strelnikova E.A. Numerical simulation of free liquid-induced vibrations in elastic shells. *International Journal of Modern Physics and Applications*. 2015. Vol.1. №4. P. 159-168.

6. Degtyarev K.G., Gnitko V.I., Naumenko V.V., Strelnikova E.A. Reduced boundary element method for liquid sloshing analysis of cylindrical and conical tanks with baffles. *Int. Journal of Electronic Engineering and Computer Sciences*. 2016. Vol.1. №1. P. 14-27.
7. Ravnik J., Strelnikova E.A., Gnitko V.I., Degtyarev K.G., Ogorodnyk U. BEM and FEM analysis of fluid-structure interaction in a double tank. *Engineering Analysis with Boundary Elements*, 2016. Vol.67. P. 13–25. (SCOPUS)
8. Gnitko V.I., Degtyarev K.G., Naumenko V.V., Strelnikova E.A. BEM and FEM analysis of the fluid-structure interaction in tanks with baffles. *International Journal of Computational Methods and Experimental Measurements*, 2017. Vol.5. №3. P. 317-328. (SCOPUS)
9. Gnitko V.I., Degtyarev K.G., Naumenko V.V., Strelnikova E.A. Coupled BEM and FEM analysis of fluid-structure interaction in dual compartment tanks. *International Journal of Computational Methods and Experimental Measurements*, 2018. Vol.6. №6. P. 976–988. (SCOPUS)
10. Degtyarev K.G., Gnitko V.I., Naumenko V.V., Strelnikova E.A. A comparative analysis of axisymmetric vibrations of conical and cylindrical fluid-filled elastic shells. *Вісник Харківського національного університету імені В.Н. Каразіна, серія «Математичне моделювання. Інформаційні технології. Автоматизовані системи управління»*. Харків: ХНУ, 2018. Т.38. С. 33-41.
11. Degtyarev K.G., Zaydenvarg O.L., Moskalenko R.P., Naumenko Y.V. Розрахункова модель для оцінки довговічності елементів конструкцій за наявності отворів та тріщин. *Вісник Харківського національного університету ім. В.Н. Каразіна, серія «Математичне моделювання. Інформаційні технології. Автоматизовані системи управління»*. Харків: ХНУ, 2019. Т.44. С. 34-42.
12. Гнітько В.І., Дегтярьов К.Г., Мироненко М.Л. Метод дискретних особливостей у задачах коливань заповнювача паливних баків при перевантаженнях та в умовах низької гравітації. *Вісник Харківського національного університету імені В.Н. Каразіна, серія «Математичне моделювання. Інформаційні технології. Автоматизовані системи управління»*. Харків: ХНУ, 2019. №41. С. 20-26.
13. Гнітько В.И., Дегтярев К.Г., Кононенко Е.С., Тонконоженко А.М. Сравнение методов конечных и граничных элементов в задачах о колебаниях составной оболочки вращения с жидкостью. *Вісник Харківського національного університету імені В.Н. Каразіна, серія «Математичне моделювання. Інформаційні технології. Автоматизовані системи управління»*. Харків: ХНУ, 2019. Т.42. С. 38-45.
14. Strelnikova E., Kriutchenko D., Gnitko V., Degtyarev K. Boundary element method in nonlinear sloshing analysis for shells of revolution under longitudinal excitations. *Engineering Analysis with Boundary Elements*, 2020. Vol.111. P. 78–87. (SCOPUS)
15. Gnitko V.I., Degtyarev K.G., Moskalenko R.P., Strelnikova O.O. Расчетная модель для анализа долговечности элементов конструкций с дефектами. *Проблемы машиностроения*, 2020. Т.23. №1. С. 27-38.

16. К.Г. Дегтярьов, В.І. Гнітько, А.М. Тонконоженко. Метод скінченних елементів при визначенні руйнівного навантаження на перфоровану оболонку при короткочасних силових впливах. *Вісник Харківського національного університету ім. В.Н. Каразіна, серія «Математичне моделювання. Інформаційні технології. Автоматизовані системи управління»*. Харків: ХНУ, 2020. Т.48. С. 22-35.
17. Гнітько В.И., Дегтярев К.Г., Науменко В.В., Стрельникова Е.А. Математическая модель колебаний оболочки вращения с изменяющимся уровнем заполнения жидкостью. *Труды XV Международной научно-технической конференции МКММ-2014, посвященной 160-летию со дня рождения Анри Пуанкаре, Вестник Херсонского национального технического университета*, Херсон, 16-20 сентября 2014. №3(50). С. 21-25.
18. Degtyarev K.G., Gnitko V.I., Naumenko V.V., Strelnikova E.A. BEM in free vibration analysis of elastic shells coupled with liquid sloshing. *Proc. of XXXVIII International Conference on Boundary Elements and Other Mesh Reduction Methods*, New Forest (UK), 21-23 September 2015. Vol.61. P. 35-46.
19. Gnitko V.I., Degtyarev K.G., Karaiev, A.A., Strelnikova E.A. Multi-domain boundary element method for axisymmetric problems in potential theory and linear isotropic elasticity. *Proc. of XLI International Conference on Boundary Elements and Other Mesh Reduction Methods*, New Forest (UK), 11-13 September 2018, Vol.122. P. 13–25. (SCOPUS)
20. Gnitko V.I., Degtyarev K.G., Karaiev A.O., Strelnikova E.A. Singular boundary method in a free vibration analysis of compound liquid-filled shells. *Proc. of XLII International Conference on Boundary Elements and Other Mesh Reduction Methods*, Coimbra (Portugal), 2-4 July 2019, Vol.126. P. 189–200. (SCOPUS)
21. Клименко Д.В., Тонконоженко А.М., Стрельникова Е.А., Гнітько В.И., Дегтярев К.Г., Чоудхари Н. Компьютерное моделирование динамики топливных баков ракет-носителей на разных стадиях полета. Доповіді II міжнародної науково-технічної конференції «Динаміка, міцність та моделювання в машинобудуванні». Харків: Інститут проблем машинобудування ім. А. М. Підгорного НАН України. 2020. <https://ipmach.kharkov.ua/wp-content/uploads/2020/10/28.pdf>

АНОТАЦІЯ

Дегтярьов К. Г. Статичні та динамічні характеристики елементів конструкцій ракетної техніки з урахуванням явищ гідропружності та пластичності – На правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.02.09 – динаміка та міцність машин. – Інститут проблем машинобудування ім. А. М. Підгорного НАН України, Харків, 2021.

Дисертаційну роботу присвячено вирішенню науково-практичної задачі, що полягає в створенні методів визначення руйнівних навантажень оболонкових конструкцій з врахуванням пластичних деформацій матеріалу і розробці методів оцінки частот коливань баків з урахуванням ефектів гідро-

пружності за різні умови експлуатації з використанням методів комп'ютерного моделювання.

На основі рівнянь руху суцільного середовища розроблено єдиний підхід до розв'язання крайових задач шляхом використання методу зважених нев'язок та побудови основних розв'язувальних співвідношень на основі методів скінченних та граничних елементів. В отриманих співвідношеннях використані різні залежності між напруженнями та деформаціями або швидкостями деформацій.

Побудовано неперервні і дискретні моделі для визначення частот і форм вільних коливань оболонкових конструкцій з відсіками, частково заповненими стислою в'язкою рідиною, з урахуванням пружності стінок, плескань заповнювача, різних рівнів заповнення та перевантаження. Досліджено конструкцію другого ступеня ракети-носія з метою визначення власних частот конструкції та плескань вільної поверхні рідини за різних умов експлуатації. Побудовано залежності частот від рівня гравітації в польоті першого ступеня та залежно від часу польоту в польоті другого ступеня з урахуванням пружності стінок та різних рівнів перевантаження.

Досліджено міцність посудин тиску при одночасній дії внутрішнього тиску і стискаючої сили на кришку бака. Розроблено методику визначення руйнівного навантаження. При цьому комп'ютерне віртуальне випробування відтворювало схему та методологію натурального експерименту. Запропоновано різні скінченно-елементні розрахункові схеми з метою врахування конструктивних особливостей та можливості спрощення як віртуальної, так і натурної моделі бака. Результати розрахунку за уточненою тривимірною моделлю практично збігаються з результатами для спрощених моделей, що дозволило зробити висновок про можливість використання спрощених моделей не лише при віртуальних, а й при натурних випробуваннях.

Надано оцінку напружено-деформованого стану циліндричної оболонки з періодичною системою отворів, отримано руйнівні навантаження та визначений момент появи тріщин. За допомогою комп'ютерного моделювання здійснено вибір конструкції найменшої товщини, яка витримує задані інтенсивні короткочасні навантаження.

Ключові слова: напружено-деформований стан, пластичне деформування, коливання, оболонкові системи, баки ракет-носіїв, гідропружна взаємодія, методи зважених нев'язок, методи скінченних і граничних елементів.

ABSTRACT

Degtyarev K.G. Static and dynamic characteristics of structure elements in space technologies considering plasticity and hydro-elasticity effects. – Manuscript.

Thesis for Candidate of technical sciences degree in speciality 05.02.09 - Dynamics and Strength of Machines. – A. Pidhornyi Institute of Mechanical Engineering Problems of the NASU, Kharkiv, 2021.

The thesis is devoted to solution of the scientific and practical problem that consists in developing methods for estimation of destructive loads on shell structures taking into account plastic deformations of materials and methods for simulating tank vibration frequencies taking into account the effects of hydro-elasticity under different operating conditions.

Based on equations of continuous medium motion, a unified approach to solving boundary value problems has been developed by using the method of weighted residuals and receiving the resolving relations based on finite and boundary element methods. In the obtained relations different dependences between stresses and strains or strain rates are used.

Continuous and discrete models are obtained to determine the frequencies and modes of free vibrations of shell structures with compartments partially filled with compressible viscous fluid, taking into account the elasticity of walls, liquid sloshing, different levels of filling and overloads. The fuel tank of the launch vehicle's second stage was studied in order to determine the natural frequencies of structures and sloshing of the liquid free surface under different operating conditions. The dependences of the frequencies on the level of gravity in the flight of the first stage, and depending on the flight time in the flight of the second stage, taking into account the elasticity of the walls and different levels of overload, are received.

The strength of pressure vessels under the simultaneous action of internal pressure and compressive force on the tank lid was studied. The method for determining the destructive load has been developed. The computer virtual test reproduced the scheme and methodology of the field experiment. Various finite-element calculation schemes were proposed in order to take into account the design features and the possibility of simplifying both the virtual and field model of the tank. The calculation results on the refined three-dimensional model almost coincide with ones for simplified models. That allowed us to conclude about possibility of using simplified models not only in virtual but also in field full-scale tests.

The estimate of the stress-strain state of the cylindrical shell with the periodic system of holes is given, destructive loads are obtained and the moment of cracking is determined. With the help of computer simulation, a design of the smallest thickness that can withstand the specified intense short-term loads was proposed.

Key words: stress-strain state, plastic deformation, vibrations, shell systems, launch vehicle tanks, hydro-elastic interaction, methods of weighted residuals, finite and boundary element methods.

АННОТАЦИЯ

Дегтярев К.Г. Статические и динамические характеристики элементов конструкций с учетом эффектов пластичности и гидроупругости. – На правах рукописи.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.02.09 – динамика и прочность машин. – Институт проблем машиностроения им. А. Н. Подгорного НАН Украины, Харьков, 2021.

Диссертационная работа посвящена решению научно-практической задачи, которая заключается в создании методов определения разрушающих нагрузок на оболочечные конструкции с учетом пластических деформаций материала и разработке методов оценки частот колебаний баков с учетом эффектов гидро-упругости при различных условиях эксплуатации с использованием методов компьютерного моделирования.

На основе уравнений движения сплошной среды разработан единый подход к решению рассмотренных краевых задач путем использования метода взвешенных невязок и построения основных разрешающих соотношений на основе методов конечных и граничных элементов. В полученных соотношениях использованы различные зависимости между напряжениями и деформациями или скоростями деформаций.

Построены непрерывные и дискретные модели для определения частот и форм свободных колебаний оболочечных конструкций с отсеками, частично заполненными сжимаемой вязкой жидкостью, с учетом упругости стенок, плесканий заполнителя, различных уровней заполнения и перегрузки. Исследована конструкция второй ступени ракеты-носителя с целью определения собственных частот конструкции и плесканий свободной поверхности жидкости при различных условиях эксплуатации. Определены зависимости частот от уровня гравитации в полете первой ступени, и в зависимости от времени полета в полете второй ступени с учетом упругости стенок и различных уровней перегрузки.

Исследована прочность сосудов давления при одновременном действии внутреннего давления и сжимающей силы на крышку бака. Разработана методика определения разрушающей нагрузки на резервуар. При этом компьютерные виртуальные испытания воспроизводили схему и методологию натурального эксперимента. Предложены различные конечно-элементные расчетные схемы с целью учета конструктивных особенностей и возможности упрощения как виртуальной, так и натурной модели бака. Результаты расчета по уточненной трехмерной модели практически совпадают с результатами для упрощенных моделей, что позволило сделать вывод о возможности использования упрощенных моделей не только при виртуальных, но и при натуральных испытаниях.

Дана оценка напряженно-деформированного состояния цилиндрической оболочки с периодической системой отверстий, определены разрушающие нагрузки и момент появления трещин. С помощью компьютерного моделирования осуществлен выбор конструкции наименьшей толщины, которая выдерживает заданные интенсивные кратковременные нагрузки.

Ключевые слова: напряженно-деформированное состояние, пластическое деформирование, колебания, оболочечные системы, баки ракет-носителей, гидроупругое взаимодействие, методы взвешенных невязок, методы конечных и граничных элементов.