

УДК 629.7.023:629.76:531.3

О.С. КОНОХОВ, канд.техн. наук (Нац. техн. ун-т України «Київський політехнічний інститут»),
М.І. ЛУХАНІН, д-р техн. наук (Центр. наук.-дослід. ін-т озброєння
та військової техніки Збройних Сил України, м. Київ)

РОЗРАХУНКОВА МЕТОДИКА ПРИВЕДЕННЯ ЦИЛІНДРОВИХ СЕКЦІЙ РІДИННИХ РАКЕТ-НОСІЇВ ДО РІВНООБОЛОНКОВИХ АНАЛОГІВ^{*}

Запропоновано універсальний чисельний метод, який має визначення жорсткості та інерційно-масових характеристик еквівалентних гладких оболонок, що апроксимують вафельні секції за динамічним аналізом ракет-носіїв. Техніку «згладжування» проілюстровано на прикладі амплітудно-частотного аналізу фрагмента вафельної циліндричної оболонки вафельної конструкції головного обтічника ракети-носія. Ефективність методу підтверджено порівняльним аналізом 10 власних частот і форм коливань та її рівнооболонкової апроксимації.

Предложен универсальный численный метод определения жесткости и инерционно-массовых характеристик эквивалентных гладких оболочек, аппроксимирующих вафельные секции при динамическом анализе ракет-носителей. Техника «сглаживания» проиллюстрирована на примере амплитудно-частотного анализа фрагмента вафельной цилиндрической оболочки вафельной конструкции головного обтекателя ракеты-носителя. Эффективность метода подтверждена сравнительным анализом 10 собственных частот и форм колебаний и ее гладкооболочечной аппроксимации.

Вступ. Розвиток ракетно-космічної техніки пов'язано з структурним ускладненням ракет-носіїв (РН), одночасним збільшенням їхньої міцності за мінімізації маси конструктивних елементів. У цьому зв'язку актуальним є розрахункове визначення динамічних характеристик РН на стадії проектування.

Побудова раціональних динамічних моделей РН [1] містить, як правило, елементи евристики [2, 3] й досягається послідовним порівнянням даних розрахункового дослідження, яке отримано для різних ступенів ідеалізації вихідного об'єкта. Ступінь адекватності динамічної моделі залежить від необхідної точності обчислень у разі введення ряду гіпотез і спрощуючих припущень, в тому числі й від деталізації геометрії конструктивних елементів РН.

У даній роботі раціональна спрощуюча апроксимація геометрії оболонкових елементів РН із використанням умов еквівалентності ха-

рактеристик жорсткості та інерційно-масових показників лежить в основі подальшого дослідження власних частот і форм коливань. У цьому разі для ефективного визначення динамічних характеристик вафельної циліндричної секції головного обтічника (ГО) РН застосовували гладкооболонкову апроксимацію. Такий підхід дозволив відмовитися від залучення невиправдано великих обчислювальних ресурсів у разі математичного моделювання динаміки ГО за основою тривимірних скінченних елементів (СЕ) [4], так як скінченно-елементне представлення імітаційної моделі ГО з апроксимацією циліндричних секцій рівними оболонками допускає використання двовимірних оболонкових СЕ, які забезпечують ефективність розрахункового дослідження динаміки ГО.

Мета роботи полягає в створенні динамічної пружної моделі конструктивно-ортотропної рівної оболонки з еквівалентними характе-

^{*}Авторизований переклад статті з російської мови авторів.

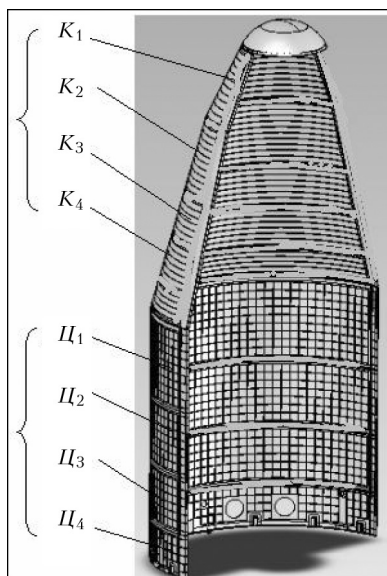


Рис. 1. Стулка головного обтічника РН

ристиками жорсткості та інерційно-масовими показниками підкріпленої оболонки вафельного типу циліндричної секції стулки ГО, розробці та апробації методики розрахунку даних параметрів приведення.

Постановка задачі. Як об’єкт дослідження розглядається стулка ГО (рис. 1), що складається з біконічної і циліндричної секцій, які розділено на 4 відсіки (K_1-K_4) та (C_1-C_4) відповідно. Відсіки стулків ГО, які розглянуто, є тонкостінними оболонками, що мають підкріплення силовими шпангоутами й їх виконано у вигляді оболонки вафельної конструкції, у якій підкріплювальними елементами комірок є допоміжні стрингери й шпангоути (рис. 2). За цим розміри висоти $H_{стр}$ та ширини $B_{стр}$ допоміжних стрингерів, а також аналогічні розміри допоміжних шпангоутів ($H_{шп}$, $B_{шп}$) значно поступають величинам їхніх довжин ($L_{стр}$, $L_{шп}$) в межах комірок прямокутної форми.

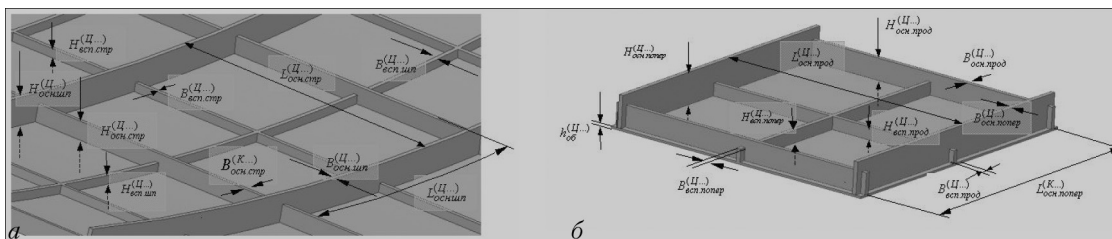


Рис. 2. Конструкція комірок вафельної оболонки стулки ГО (а) й плоский прототип-аналог типової комірки циліндричної секції ГО (б)

Таблиця 1. Геометричні характеристики в поздовжньому напрямку кожного відсіку циліндричної секції ГО

Повна довжина в поздовжньому напрямку відсіку C_1 циліндричної секції $L_{полн. прод}^{C_1}$, м	Повна довжина в поздовжньому напрямку відсіку C_2 циліндричної секції $L_{полн. прод}^{C_2}$, м	Повна довжина в поздовжньому напрямку відсіку C_3 циліндричної секції $L_{полн. прод}^{C_3}$, м	Повна довжина в поздовжньому напрямку відсіку C_4 циліндричної секції $L_{полн. прод}^{C_4}$, м
1,000	1,200	1,200	0,600

У всіх відсіках оболонки ГО має місце рівномірний розподіл комірок вафельної конструкції (рис. 2, а). Наприклад, у межах кожної із чотирьох циліндричних секцій відсіків (табл. 1) можна спостерігати регулярне повторення конструкції допоміжних стрингерів і шпангоутів оболонки ГО уздовж її поздовжньої осі та в окружному напрямленні (рис. 2, б). Сітка допоміжних підкріплюючих елементів оболонки ГО ортогональна й збігається з лініями головної кривизни її відсіків. Систему підкріплень кожної секції відсіків ГО розташовано несиметрично щодо серединної поверхні оболонки обшивки.

Допоміжні стрингери й шпангоути, що утворюють на внутрішній поверхні відсіків ГО ребра комірок щільності, яку задано, визначають характеристики жорсткості секцій оболонки у відповідних напрямленнях.

Матеріал стулків ГО — алюмінієвий сплав АМг6М, що має наступні пружні та масові характеристики: $E = 700$ ГПа — модуль пружності; $\mu = 0,227$ — коефіцієнт Пуассона; $\rho = 2640$ кг/м³ — щільність матеріалу.

Методика розрахунку. Приймаємо в якості координатної розрахункової поверхні еквівалентної гладкої оболонки серединну поверхню обшивки вафельного типу циліндричної секції ГО. Рахуємо, що в межах кожного від-

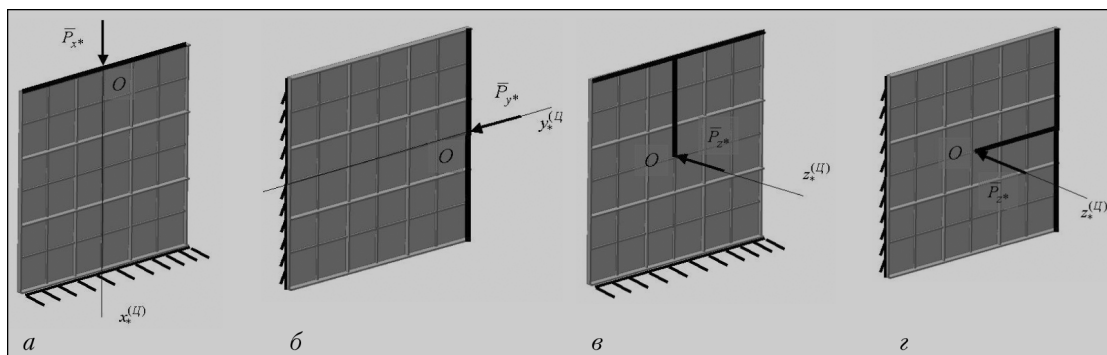


Рис. 3. Схема визначення поздовжньої і поперечної піддатливостей фрагмента оболонки циліндричної секції ГО, яку підкріплено, у разі деформацій стиску (а) й вигину (б)

сіку ступки ГО має місце рівномірний розподіл осередків вафельної конструкції тонкостінної оболонки малої кривизни (рис. 1 і 2). Допоміжні стрингери й шпангоути, що утворюють ребра комірок відсіків ступок, визначають параметри жорсткості розглянутої оболонки, яку підкріплено, відсіку ГО у відповідних напрямленнях. Підкріплення відсіків ГО характеризуються такими відомими величинами: n_i — кількість підкріплюючих елементів у напрямленні α_i ; F_i — площа підкріплюючого елемента; S_i та J_i — статичний момент і момент інерції поперечного перетину підкріплюючого елемента відповідно щодо осі, яка проходить через середину поверхню обшивки; l_i — середня відстань між підкріпленнями; E_i^0 — модуль Юнга підкріплень ($i = 1, 2$).

Для розрахунку параметрів жорсткості та інерційно-масових характеристик еквівалентної рівної оболонки циліндричної секції ГО вафельної конструкції, яка має циклічну симетрію геометрії допоміжних шпангоутів і стрингерів в окружному й поздовжньому напрямленнях, досить розглянути відповідний типовий фрагмент (рис. 2, б) [2].

Як критерій оцінки відповідності величин жорсткості та інерційно-масових характеристик вихідної секції оболонки ГО з ізотропними пружними властивостями матеріалу й гладкою еквівалентною їй конструкцією з ортотропними властивостями цього матеріалу, вибрано рівність величин власних частот і типів форм коливань «розпрямленого» фрагмента підкріпленої оболонки вафельного типу циліндричної секції ГО з габаритними розмі-

рами у поздовжньому $L_{\text{фр.прод}}^{(II)}$ й поперечному $L_{\text{фр.попер}}^{(II)}$ напрямленнях (рис. 3).

Чисельні значення піддатливостей на розтяг $\delta_{\text{раст1}}^{(II)}$ і вигин $\delta_{\text{изг1}}^{(II)}$ для поздовжнього напрямлення піддатливості розпрямленого фрагмента оболонки, яку підкріплено, можна визначити за допомогою системи інженерного аналізу (наприклад, MSC/NASTRAN [5]) згідно схем силового навантаження, які показано на рис. 3, за наступними правилами

$$\delta_{\text{раст1}}^{(II)} = u_{x^*} \Big|_{\bar{P}_{x^*} = 1}; \quad \delta_{\text{изг1}}^{(II)} = u_{z^*} \Big|_{\bar{P}_{z^*} = 1}, \quad (1)$$

де \bar{P}_{x^*} та u_{x^*} — одинична сила й викликане нею переміщення в напрямленні вісі $O_{x^*}^{(II)}$ (рис. 3); \bar{P}_{z^*} та u_{z^*} — одинична сила й викликане нею переміщення в напрямленні вісі (рис. 3, б).

Вважаючи, що конструктивні елементи допоміжних шпангоутів і стрингерів є рівномірно розподілено за поверхнею оболонки циліндричної секції ступок ГО, які підкріплено, визначення піддатливостей $\delta_{\text{раст1}}^{(II)}$ і $\delta_{\text{изг1}}^{(II)}$ та відповідних їм жорсткостей на розтяг і вигин у поздовжньому напрямленні фрагмента підкріпленої оболонки, яку розпрямлено, проводили за формулами

$$\delta_{\text{раст1}}^{(II)} = \frac{L_{\text{фр.прод}}^{(II)}}{L_{\text{фр.попер}}^{(II)} D_{\text{раст1}}^{(II)}}; \quad \delta_{\text{раст1}}^{(II)} = \frac{(L_{\text{фр.прод}}^{(II)})^3}{L_{\text{фр.попер}}^{(II)} D_{\text{раст1}}^{(II)}}; \quad (2)$$

$$D_{раст1}^{(II)} = \frac{L_{фр.прод}^{(II)}}{L_{фр.попер}^{(II)} \delta_{раст1}^{(II)}}; \quad (3)$$

$$D_{раст1}^{(II)} = \frac{(L_{фр.прод}^{(II)})^3}{12L_{фр.попер}^{(II)} \delta_{раст1}^{(II)}};$$

де $L_{фр.попер}^{(II)}$ та $L_{фр.прод}^{(II)}$ — довжина розпрямленого фрагмента оболонки, яку підкріплено, в поздовжньому й поперечному напрямках; $D_{раст1}^{(II)}$ та $D_{изг1}^{(II)}$ — погонні жорсткості на розтяг і вигин в поздовжньому напрямку оболонки, яку підкріплено.

За умовою еквівалентності погонних жорсткостей у поздовжньому напрямку ортотропної гладкої і підкріпленої оболонок мають місце такі співвідношення

$$D_{эқв.раст1}^{(II)} = D_{раст1}^{(II)}; \quad D_{эқв.изг1}^{(II)} = D_{изг1}^{(II)}; \quad (4)$$

$$D_{эқв.раст1}^{(II)} = E_{эқв1}^{(II)} h_{эқв}^{(II)}; \quad D_{эқв.изг1}^{(II)} = \frac{1}{12} E_{эқв1}^{(II)} (h_{эқв}^{(II)})^3; \quad (5)$$

$$E_{эқв1}^{(II)} = \frac{E_{эқв1}^{(II)}}{1 - \mu_{эқв1}^{(II)} \mu_{эқв2}^{(II)}}, \quad (6)$$

де $E_{эқв1}^{(II)}$ — ефективний модуль пружності для поздовжнього напрямку еквівалентної ортотропної гладкої оболонки.

З метою спрощення викладок коефіцієнти Пуассона еквівалентної ортотропної гладкої оболонки $\mu_{эқв1}^{(II)}$ та $\mu_{эқв2}^{(II)}$ вибирали рівними нулю

$$\mu_{эқв1}^{(II)} = \mu_{эқв2}^{(II)} = 0. \quad (7)$$

Враховуючи (7), співвідношення (6) може бути представлено у вигляді

$$E_{эқв1}^{(II)} = E_{эқв1}^{(II)}. \quad (8)$$

Маючи в своєму розпорядженні чисельні значення погонних жорсткостей для поздовжнього напрямку еквівалентної ортотропної гладкої оболонки циліндричної секції, відповідно до виразу (5), товщину $h_{эқв}^{(II)}$ цієї оболонки розраховували наступним чином:

$$h_{эқв}^{(II)} = \sqrt{\frac{12D_{эқв.изг1}^{(II)}}{D_{эқв.раст1}^{(II)}}}. \quad (9)$$

За цим модуль пружності $E_{эқв1}^{(II)}$ в поздовжньому напрямку еквівалентної ортотропної гладкої оболонки відповідно до виразів (3)–(5) може бути знайдено за формулою

$$E_{эқв1}^{(II)} = \frac{D_{эқв.раст1}^{(II)}}{h_{эқв}^{(II)}}. \quad (10)$$

Для поперечного напрямку розгорнутого фрагмента оболонки, яку підкріплено, чисельні значення його піддатливостей на розтяг і вигин $\delta_{раст2}^{(II)}$ і $\delta_{изг2}^{(II)}$ також можна визначити за допомогою системи інженерного аналізу відповідно до схем силового навантаження, показаних на рис. 3, б і 3, г, за правилами

$$\delta_{раст2}^{(II)} = u_{y*} \Big|_{\bar{P}_{y*} = 1}; \quad \delta_{изг2}^{(II)} = u_{z*} \Big|_{\bar{P}_{z*} = 1}, \quad (11)$$

де \bar{P}_{y*} та u_{y*} — одинична сила й переміщення, яке викликано нею, в напрямку $O_{*}y$ осі (рис. 3, б); \bar{P}_{z*} та u_{z*} — одинична сила й викликане нею переміщення в напрямку осі $O_{*}z$ (рис. 3 г).

За гіпотезою рівномірного розподілу підкріплюючих елементів за поверхнею оболонки вафельного типу циліндричної секції у поперечному напрямку, визначали величини піддатливостей $\delta_{раст2}^{(II)}$ та $\delta_{изг2}^{(II)}$ на розтяг і вигин та погонних жорсткостей $D_{раст2}^{(II)}$ та $D_{изг2}^{(II)}$, які їм відповідні, в поперечному напрямку розпрямленого фрагмента оболонки, яку підкріплено, за формулами

$$\delta_{раст2}^{(II)} = \frac{L_{фр.попер}^{(II)}}{L_{фр.прод}^{(II)} D_{раст2}^{(II)}}; \quad (12)$$

$$\delta_{изг2}^{(II)} = \frac{(L_{фр.попер}^{(II)})^3}{12L_{фр.прод}^{(II)} D_{изг2}^{(II)}};$$

$$D_{раст2}^{(II)} = \frac{L_{фр.попер}^{(II)}}{L_{фр.прод}^{(II)} \delta_{раст2}^{(II)}};$$

$$D_{изг2}^{(II)} = \frac{(L_{фр.попер}^{(II)})^3}{12L_{фр.прод}^{(II)} \delta_{изг2}^{(II)}}; \quad (13)$$

Згідно умови еквівалентності погонних жорсткостей на розтяг в поперечному напрямку

ленні підкріпленої та ортотропної рівної оболонки має місце співвідношення

$$D_{\text{екв.раст2}}^{(II)} = D_{\text{раст2}}^{(II)}. \quad (14)$$

Погонна жорсткість на розтяг для поперечного направлення еквівалентної ортотропної рівної оболонки (з урахуванням нульових значень коефіцієнтів Пуассона) через її параметри визначено наступним чином:

$$D_{\text{екв.раст2}}^{(II)} = E_{\text{екв2}}^{(II)} h_{\text{екв}}^{(II)}. \quad (15)$$

Відповідно до виразу (15) модуль пружності для поперечного напрямку $E_{\text{екв2}}^{(II)}$ еквівалентної ортотропної гладкої оболонки представлено формулою:

$$E_{\text{екв2}}^{(II)} = \frac{D_{\text{раст2}}^{(II)}}{h_{\text{екв}}^{(II)}}. \quad (16)$$

Для узгодження величин інерційно-масових характеристик оболонки циліндричної секції, яку підкріплено, та відповідної їй еквівалентної ортотропної рівної оболонки визначали масу $m_{\text{фр}}^{(II)}$ розпрямленого фрагмента оболонки циліндричної секції. Згідно вимоги рівності величин інерційних характеристик розглянутого фрагмента оболонки, яку підкріплено, й відповідного йому фрагмента еквівалентної ортотропної рівної оболонки, справедливим є наступний вираз:

$$m_{\text{фр.екв}}^{(II)} = m_{\text{фр}}^{(II)}. \quad (17)$$

Маючи в своєму розпорядженні габаритні розміри $L_{\text{фр.прод}}^{(II)}$ та $L_{\text{фр.попер}}^{(II)}$ (табл. 1), а також величину товщини $h_{\text{екв}}^{(II)}$ фрагмента, який розглянуто, еквівалентної ортотропної рівної оболонки, його об'єм представим як

$$V_{\text{фр.екв}}^{(II)} = L_{\text{фр.прод}}^{(II)} L_{\text{фр.попер}}^{(II)} h_{\text{екв}}^{(II)}. \quad (18)$$

За відомими величинами маси $m_{\text{фр.екв}}^{(II)}$ та об'єму $V_{\text{фр.екв}}^{(II)}$, визначали щільність матеріалу еквівалентної ортотропної рівної оболонки за формулою:

$$\rho_{\text{екв}}^{(II)} = \frac{m_{\text{фр.екв}}^{(II)}}{V_{\text{фр.екв}}^{(II)}}. \quad (19)$$

Таким чином, відповідно до виразів (9), (10), (16) й (19) отримано співвідношення для всіх розрахункових параметрів еквівалентної ортотропної рівної оболонки циліндричної секції ГО.

Прирівнюючи масу $m_{\text{фр.екв}}^{(II)}$ і погонні жорсткості $D_{\text{екв.раст1}}^{(II)}$, $D_{\text{екв.изг1}}^{(II)}$ і $D_{\text{раст2}}^{(II)}$ еквівалентної ортотропної рівної оболонки відповідно до маси $m_{\text{фр}}^{(II)}$ і погонних жорсткостей $D_{\text{раст1}}^{(II)}$, $D_{\text{изг1}}^{(II)}$, $D_{\text{раст2}}^{(II)}$ оболонки, яку підкріплено, що було визначено за даними чисельного експерименту в системі MSC/NASTRAN (ліцензія ДКБ «Південне»), отримуємо чотири незалежних параметри $\rho_{\text{екв}}^{(II)}$, $h_{\text{екв}}^{(II)}$, $E_{\text{екв1}}^{(II)}$ і $E_{\text{екв2}}^{(II)}$, які разом із коефіцієнтами Пуассона $\mu_{\text{екв1}}^{(II)}$ і $\mu_{\text{екв2}}^{(II)}$ повністю характеризують еквівалентну ортотропну рівну оболонку.

Після визначення параметрів поздовжньої жорсткості виконуємо узгодження жорсткостей на згин у поперечному напрямленні (рис. 3, б, з) еквівалентної ортотропної гладкої оболонки й оболонки, яку підкріплено, відсіків Π_1 – Π_4 ГО (рис. 4).

Питома (така, що припадає на одиницю довжини) жорсткість на згин $\kappa_{\text{изг2}}^{(II...)}$ у поперечному напрямленні оболонки, яку підкріплено, циліндричної секції відсіку Π визначено формулою:

$$\kappa_{\text{изг2}}^{(II...)} = 12L_{\text{полн.прод}}^{(II...)} D_{\text{изг2}}^{(II...)}, \quad (20)$$

а відповідну величину $\kappa_{\text{екв.изг2}}^{(II...)}$ для еквівалентної ортотропної рівної оболонки представлено як

$$\kappa_{\text{екв.изг2}}^{(II...)} = L_{\text{полн.прод}}^{(II...)} (h_{\text{екв}}^{(II...)})^3 \frac{E_{\text{екв2}}^{(II)}}{1 - \mu_{\text{екв1}}^{(II)} \mu_{\text{екв2}}^{(II)}}. \quad (21)$$

Порівнюючи між собою величини питомої жорсткості на згин підкріпленої оболонки відсіку Π , яку розглянуто, й відповідної їй еквівалентної ортотропної рівної оболонки, нев'язка $\Delta\kappa_{\text{изг2}}^{(II...)}$ складатиме наступну величину

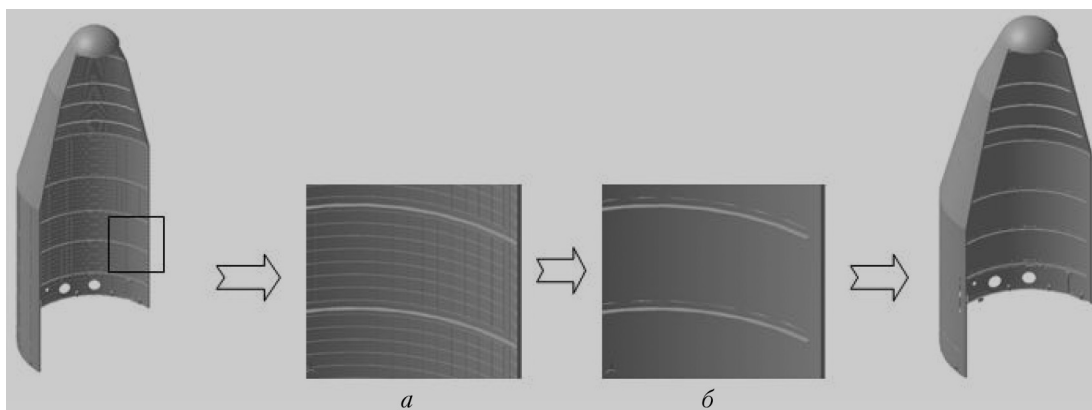


Рис. 4. Модель циліндричної секції ступки ГО та її фрагмента, що містить вафельні елементи (а) та її гладкооболонковий аналог (б)

$$\Delta\kappa_{изг2}^{(Ц...)} = \kappa_{изг2}^{(Ц...)} - \kappa_{экр.изг2}^{(Ц...)} \quad (22)$$

Дану нев'язку компенсуємо парою додаткових шпангоутів, які розташовано з обох кінців відсіку Ц. За цим є очевидним, що величина питомої жорсткості на згин одного додаткового шпангоута $\Delta\kappa_{доп.шп2}^{(Ц...)}$ буде дорівнювати половині величини нев'язки $\Delta\kappa_{изг2}^{(Ц...)}$

$$\Delta\kappa_{доп.шп2}^{(Ц...)} = \frac{1}{2} \Delta\kappa_{изг2}^{(Ц...)} \quad (23)$$

Для визначення питомої жорсткості на згин додаткового шпангоута використовували співвідношення

$$\kappa_{доп.шп2}^{(Ц...)} = (1,0 \div 4,0) E_{доп.шп}^{(Ц...)} B_{доп.шп}^{(Ц...)} (H_{доп.шп}^{(Ц...)})^3, \quad (24)$$

Таблиця 2. Власні частоти фрагментів вафельної та еквівалентної гладкої оболонки ГО, яку підкріплено

Власні частоти ω_i	Власна частота підкріпленої вафельної оболонки ω_i , [Гц]	Власна частота фрагмента гладкої оболонки $\omega_i^{экр}$, [Гц]	Відносна помилка $\eta_i = \left \frac{\omega_i - \omega_i^{экр}}{\omega_i} \right 100\%$
ω_1	14,0	14,2	1,4
ω_2	27,2	37,3	36,0
ω_3	85,5	87,4	2,2
ω_4	132	144	9,4
ω_5	234	246	5,2
ω_6	307	327	6,4
ω_7	343	376	9,7
ω_8	354	422	19,0
ω_9	417	477	15,0

де $B_{доп.шп}^{(Ц...)}$ та $H_{доп.шп}^{(Ц...)}$ — товщина й висота додаткового шпангоута відповідно; $E_{доп.шп}^{(Ц...)}$ — модуль пружності матеріалу додаткового шпангоута. Величина коефіцієнта (1,0÷4,0) залежить від величини зміщення $z_{доп.шп}^{(Ц...)}$ центра ваги перетину шпангоута відносно нейтральної лінії, яке матиме місце у разі згину в поперечному напрямку розглянутої еквівалентної ортотропної рівної оболонки, яку посилено двома додатковими шпангоутами.

Зазначимо, що у разі вибору розмірів для поперечного перетину додаткового шпангоута необхідно, щоб його висота значно перевершувала товщину

$$H_{доп.шп}^{(Ц...)} > B_{доп.шп}^{(Ц...)} \quad (25)$$

Виконання умови (25) дозволяє додатковим шпангоутам чинити істотний вплив на жорсткість у разі згину в поперечному напрямленні еквівалентної ортотропної гладкої оболонки. Водночас жорсткість на розтягування в поперечному напрямку, а також жорсткості на згин і розтягування в поздовжньому напрямку еквівалентної ортотропної рівної оболонки будуть мало залежати від додаткових шпангоутів.

У випадку відомих величин модуля пружності $E_{доп.шп}^{(Ц...)}$ матеріалу й товщини $B_{доп.шп}^{(Ц...)}$ додаткового шпангоута, його висоту $H_{доп.шп}^{(Ц...)}$ може бути знайдено за формулою, що її одержано з виразу (24):

$$H_{\text{доп.шп}}^{(I\dots)} = (0,63 \div 1,00) \left(\frac{\kappa_{\text{доп.шп}}^{(I\dots)}}{E_{\text{доп.шп}}^{(I\dots)} B_{\text{доп.шп}}^{(I\dots)}} \right)^{1/3}. \quad (26)$$

Перевірка ступеня ідентичності параметрів циліндричної секції вафельної і рівної оболонок (рис. 4) для перших десяти власних частот і форм коливань, які визначено, у середовищі MSC/NASTRAN, показала їхнє задовільне узгодження (табл. 2) для типових форм коливань ГО, що свідчить про ефективність методики, яку розроблено.

Висновки

1. Аналіз динаміки й міцності конструкцій ракет-носіїв із використанням методу скінченних елементів є в даний час фактичним світовим стандартом. Основою цього служить універсальність цього методу, що дозволяє за єдиним алгоритмом здійснювати розрахунки динамічних характеристик ракет-носіїв із головними обтікачами з різною компоновкою геометрії та фізико-механічними властивостями використаних матеріалів.

2. Апробацію розробленої методики проведено на прикладі дослідження власних частот і форм коливань фрагмента вафельної оболонки головного обтікача, яку підкріплено, зі застосуванням динамічної моделі просторово сполучених елементів її конструкції із розрахунковими параметрами рівної оболонки й допоміжних шпангоутів. ➔

Список літератури

1. *Микишев Г.Н.* Динамика тонкостенных конструкций с отсеками, содержащими жидкость / Г.Н. Микишев, Б.И. Рабинович. — М.: Машиностроение, 1971. — 564 с.
2. *Конюхов А.С.* Собственные колебания жидкостных ракет-носителей пакетной компоновки. / А.С. Конюхов, В.С. Легеза, А.С. Цыбенко, Н.Г. Крищук // Проблемы прочности. — № 3. — 2001. — С. 93–99
3. *Цыбенко А.С.* Розробка адекватної математичної моделі дослідження динаміки ступок головного обтічника ракети-носія у процесі польоту і відділення / А.С. Цыбенко, М.Г. Крищук, О.С. Конюхов, В.П. Коваль, А.В. Аксьonenко, А.В. Трубін // Наукові вісті НТУУ «КПІ». — 2006. — № 6. — С. 139–148.
4. *Батэ Н.* Численные методы анализа и метод конечных элементов / Н. Батэ, Е. Вилсон. — М.: Стройиздат, 1982. — 447 с.