

В. М. Рудницький¹, В. А. Дзюба²

¹ Черкаський державний технологічний університет, Черкаси, Україна

² ПВНЗ «Європейський університет», Черкаси, Україна

СПЕЦІАЛІЗОВАНА КОМП'ЮТЕРНА СИСТЕМА ДЛЯ РОЗРАХУНКУ З ПІДВИЩЕНОЮ ТОЧНІСТЮ МЕХАНІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ЗАДАЧ НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНОГО СТАНУ ТОНКОСТІННИХ ЦИЛІНДРИЧНИХ ОБОЛОНОК ЗМІННОЇ ТОВЩИНИ

Анотація. У статті пропонується новітній підхід до побудови спеціалізованої комп'ютерної системи (СКС) на основі ґрунтовного аналізу поставленої задачі, із врахуванням спільної роботи оболонки з внутрішнім наповнювачем, крайових умов, властивостей тонкостінної циліндричної оболонки, що знаходиться під дією навантаження, та разом з цим здатна зберігати початкові дані. Проведений огляд літературних джерел по тематиці статті. Обґрунтовано необхідність створення СКС, як успішної альтернативи традиційним комп'ютерним системам, оскільки поєднання апаратного та програмного забезпечення разом з механічними або іншими частинами, дає можливість знаходити рішення широкого класу задач прикладного характеру. Сформульовані загальні вимоги до структури СКС, яка призначена для вирішення найактуальніших проблем механіки деформованого твердого тіла. Деталізований алгоритм роботи розрахункового блоку із підвищеною точністю СКС, який зводиться до розв'язання СЛАР із використанням ітераційних методів, а саме методу Зейделя.

Ключові слова: спеціалізована комп'ютерна система, тонкостінна циліндрична оболонка, крайова задача, алгоритм, метод Зейделя, ітераційна схема, матриця, збіжність методу.

Вступ

Постановка проблеми. Головним інструментом сучасних інформаційних технологій є багатоформатні комп'ютерні системи (КС), які можна класифікувати за їх основними характеристиками та потужностями. За допомогою наявних комп'ютерних систем можна розв'язати велику кількість задач науково-технічного походження, проте, перед науковцями постають як окремі задачі, так і профільний підбір задач, які мають важливе практичне значення, але обчислювальні можливості існуючих апаратних комплексів КС є недостатніми для їх успішного вирішення [1-8].

Високий рівень розвитку сучасних інженерних технологій вимагає збереження надійності та міцності конструктивних систем, що призводить до виникнення нових теорій та комп'ютерних методів розрахунку, які локалізуються на базі СКС призначених для розрахункової роботи із підвищеною точністю для елементів оболонок, балок, пластин.

Тонкостінні циліндричні конструкції, є одними із найбільш поширених класів комбінованих конструкцій, які успішно використовуються в найрізноманітніших областях сучасної техніки. Це можна пояснити тим, що завдяки своїй криволінійній структурі такі циліндричні оболонки дозволяють найбільш раціонально розподілити матеріал в різнопланових спорудженнях та, крім цього, використовувати його властивості міцності при задоволенні умов міцності і стійкості [9].

При проведенні досліджень в галузі теорії оболонок, їх класифікацію визначають за їх серединною поверхнею, яка має всі необхідні геометричні та фізичні властивості, що характерні для її товщини. Актуальність дослідження в рамках тематики даної статті, стосовно побудови СКС, полягає в тому, що тонкостінні циліндричні оболонки є першоосновою

більшості відомих природних конструкцій, а також, тих, які вдосконалювали та пристосовували до використання у повсякденному житті жителі нашої планети.

Якщо до традиційних КС прийнято висувати, перш за все, умови універсальності та можливість масового поширення, то для СКС, головними вимогами є – унікальні особливості алгоритмічної та апаратної складової, а також надійність та стійкість при накладанні початкових обмежень на вихідні параметри системи тощо [10].

Провівши аналіз використання існуючих КС та компонентів можна виокремити такі основні передумови для необхідності розвитку проектування та застосування СКС:

1) розбіжності між математичною формалізацією задачі та її технічною реалізацією з використанням можливостей КС;

2) використання СКС дає змогу правильно інтерпретувати отриманий результат на потрібну предметну область;

3) гнучкість реалізації КС, тобто успішне поєднання та переміщення в інші системи [2, 10].

Успішне вирішення задач теорії тонкостінних циліндричних оболонок, неможливе без розробки СКС, як правило, подібного роду обчислювальні пристрої призначені для профільної роботи в тій чи іншій галузі науки чи техніки.

У зв'язку з цим, значна увага приділяється питанню створення СКС для моделювання замкнених оболонок змінної товщини та обрахунку їх механічних характеристик, з метою подальшого використання розрахунків підвищеної точності для виробництва тонкостінних циліндричних оболонок конструкцій, які володіють надважливими властивостями на міцність, жорсткість, стійкість тощо [4].

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Відомі теоретичні багатофільні можливості КС та

компонентів стосовно розрахунку елементів напружено-деформованого стану тонкостінних оболонкових конструкцій, при практичній реалізації, у більшості випадків, мають значні обчислювальні.

Існуючі дослідження в галузі теорії циліндричних оболонок та методів розрахунку тонкостінних оболонкових конструкцій можна виокремити у два напрямки: перший напрям – комбіновані аналітичні та напіваналітичні методи, які ґрунтуються на континуальній специфікованій моделі розрахунку, та, другий напрям, який базується на дискретному поданні розрахункової моделі, з метою використання добре відомих чисельних методів.

Аналіз наукових праць, таких відомих вчених, як: Григоренка Я. М., Григоренка А. Я., Влайкова Г. Г., Тимошенко С. П., Василенка А. Т., Стеблянка П. О., Кільчевського М. О., дає підстави стверджувати, що кожен з цих напрямків успішно розвивається та доповнює один одного [1-10]. Обидва напрямки мають в своєму арсеналі потужні обчислювальні комплекси, проте при практичній реалізації існуючих методів для складних оболонкових конструкцій виникає ряд проблем обчислюваного характеру.

Крім цього, виникає необхідність побудови загальних підходів для розрахунку оболонкових конструкцій, які б створили умови для широкого спектру застосування. Тобто виникає необхідність до розв'язання задач у просторовій постановці. При цьому з'являються математичні та обчислювальні труднощі при виконанні граничних умов з достатньою точністю.

Описані проблеми, які з'явилися на новітньому шляху розвитку є наслідком недостатньо розробленого методичного апарату для розрахунку циліндричних оболонок.

На сьогодні, серед провідних дослідників тематики даної роботи побутує думка, що значущий прогрес, можливий, при побудові спеціалізованих обчислювальних комп'ютерних систем та їх компонентів, на основі використання чисельних методів, але при умові успішного поєднання та вдосконалення апаратного комплексу аналітичних та напіваналітичних методів [9].

Метою роботи розробка спеціалізованої комп'ютерної системи, яка дозволить моделювати замкнені тонкостінні циліндричні оболонки та здійснювати розрахунок механічних характеристик задач пружно-деформованого стану оболонкових конструкцій із підвищеною точністю.

Основний матеріал

Необхідність побудови СКС можна пояснити тим, що СКС входять до складу проблемно-орієнтованих КС, які мають багатогранні можливості відносно проектування вбудованих та розподілених сучасних комп'ютерних систем в межах реального часу. Очевидним є те, що передові сучасні багатифункціональні СКС повинні бути оснащені високорівневим програмно-апаратним комплексом [10].

Оскільки при розрахунку компонентів напружено-деформованого стану циліндричних оболонок, як складних систем, виникають обчислювальні тру-

днощі із врахуванням всіх можливих характеристичних властивостей, а для значної кількості задач теорії оболонок майже неможливо отримати достовірні результати.

Їх успішне вирішення можливе, за умови побудови нових СКС, які матимуть в основі: 1) необхідні модельні уявлення; 2) комбіновані підходи; 3) методи розрахунку з підвищеною точністю; 4) достовірну практичну реалізацію пропонованих алгоритмів. Описані вимоги до структури сучасних СКС та компонентів є однією з найактуальніших проблем механіки деформованого твердого тіла і представляє безсумнівний практичний інтерес. У зв'язку з тим, що поєднання апаратного та програмного забезпечення разом з механічними або іншими частинами, дає можливість знаходити рішення для широкого класу задач прикладного характеру.

Досліджується напружено-деформований стан несиметрично навантаженої поверхні із навантаженням – q_x, q_y, q_z циліндричної оболонки кругового поперечного перерізу радіусу R у серединній поверхні. В формулюванні допускається, що товщина h оболонки може змінюватись в окружному і меридіональному напрямках. Ключовими невідомими даної задачі є: u, v, w – переміщення за твірною, направляючою та нормаллю до серединній поверхні [2].

Аналітична модель задачі тонкостінної циліндричної оболонки має такий вигляд:

$$1) \frac{\partial U}{\partial x} = -\frac{W}{R_1} + \varepsilon_1;$$

$$2) \frac{\partial V}{\partial x} = -\frac{\partial U}{\partial y} + \varepsilon_{12}; \quad 11) N_2 = c_{12}\varepsilon_1 + c_{22}\varepsilon_2;$$

$$3) \frac{\partial W}{\partial x} = W'; \quad 12) M_2 = D_{12}\chi_1 + D_{22}\chi_2;$$

$$4) \frac{\partial W'}{\partial x} = -\chi_1; \quad 13) Q_2 = H' + \frac{\partial M_2}{\partial y};$$

$$5) \frac{\partial N_1}{\partial x} = -\frac{\partial S}{\partial y}; \quad 14) \varepsilon_1 = \frac{1}{c_{11}}(N_1 - c_{12}\varepsilon_2);$$

$$6) \frac{\partial S}{\partial x} = -\frac{\partial N_2}{\partial y}; \quad 15) \varepsilon_2 = \frac{\partial V}{\partial y} + \frac{W}{R_2};$$

$$7) \frac{\partial M_1}{\partial x} = -\frac{\partial H}{\partial y} + Q_1; \quad 16) \varepsilon_{12} = \frac{S}{c_{66}};$$

$$8) \frac{\partial H}{\partial x} = H'; \quad 17) \chi_1 = \frac{1}{D_{11}}(M_1 - D_{11}\chi_2);$$

$$9) \frac{\partial Q_1}{\partial x} = -\frac{\partial Q_2}{\partial y} + \frac{N_2}{R_2} - q_z; \quad 18) \chi_2 = -\frac{\partial^2 W}{\partial y^2};$$

$$10) H' = 2 \frac{\partial D_{66}}{\partial x} \chi_{12} + 2D_{66} \frac{\partial \chi_1}{\partial y}; \quad 19) \chi_{12} = -\frac{\partial W'}{\partial y},$$

вважається, що

$$D_{66} = \frac{Eh^3}{24(1+\nu)}, D'_{66} = \frac{Eh^2 h'(x)}{8(1+\nu)},$$

$$D'_{66} = \frac{Eh^2 b_0}{8(1+\nu)},$$

де товщина оболонки змінюється за лінійним законом

$$h(x) = a_0 + b_0 x, \quad h'(x) = b_0.$$

Структура СКС базується на використанні скінченно-різницевої апроксимації похідних. Якщо проаналізувати вплив округлення на апроксимацію похідної із використанням різницевої апроксимації, то ми побачимо, що при зменшенні кроку апроксимації наближення до похідної різницевою співвідношеннями, спочатку покращується, але потім погіршується, тобто похибка округлення у різницевому співвідношенні зростає із зменшенням кроку.

Альтернативний спосіб отримання кращої апроксимації полягає в тому, щоб запропонованим способом знизити неусувну погрішність округлення при тих же значеннях на даному кроці. Очевидним є те, що знайти успішний вихід з цієї ситуації можна, якщо вибрати більш точнішу формулу для апроксимації. У основі розробленої СКС закладено такий метод розрахунку з підвищеною точністю, який зводиться до розв'язання СЛАР із використанням ітераційних методів, а саме методу Зейделя. Із врахуванням вище сказаного, розрахункові формули для прямого (U_N^k) та оберненого (V_N^k) ходу методу прогонки, із врахуванням умов стійкості процесу розрахунку у методі Зейделя, матимуть вигляд:

$$U_1^k = \frac{1}{k_2} (6hf_{10}^{k-1} + k_1 U_0 + k_3 U_2^{k-1} - k_4 U_3^{k-1});$$

$$U_2^k = \frac{1}{k_6} (6hf_{11}^{k-1} + k_4 U_0 + k_5 U_1^{k-1} + k_0 U_3^{k-1});$$

$$U_3^k = \frac{1}{k_6} (6hf_{12}^{k-1} + k_4 U_1^{k-1} + k_5 U_2^{k-1} + k_0 U_4^{k-1});$$

$$\dots\dots\dots$$

$$U_i^k = \frac{1}{k_6} (6hf_{li-1}^{k-1} + k_4 U_{i-2}^{k-1} + k_5 U_{i-1}^{k-1} + k_0 U_{i+1}^{k-1});$$

$$U_{i+1}^k = \frac{12h}{n_0} f_{li}^{k-1} + U_{i-1}^{k-1} + \frac{k_0}{n_0} (U_{i+2}^{k-1} - U_{i-2}^{k-1});$$

$$U_N^k = \frac{6}{17} h (3f_{1N-1}^{k-1} + f_{1N}^{k-1}) + \frac{9}{17} (U_{N-1}^{k-1} + U_{N-2}^{k-1}) - \frac{1}{17} U_{N-3}^{k-1};$$

$$V_0^k = -\frac{6}{17} h [f_{20}^{k-1} + 3f_{21}^{k-1}] + \frac{9}{17} (V_1^{k-1} + V_2^{k-1}) - \frac{1}{17} V_3^{k-1};$$

$$V_{j-1}^k = \frac{1}{n_0} (-12hf_{2j}^{k-1} - k_0 (V_{j+2}^{k-1} - V_{j-2}^{k-1}) + V_{j+1}^{k-1}); j = 2;$$

$$V_j^k = \frac{1}{k_6} (-6hf_{2j+1}^{k-1} + k_0 V_{j-1}^{k-1} + k_5 V_{j+1}^{k-1} + k_4 V_{j+2}^{k-1});$$

$$V_{N-2}^k = \frac{1}{k_6} (-6hf_{2N-1}^{k-1} + k_0 V_{N-3}^{k-1} + k_5 V_{N-1}^{k-1} + k_4 V_N^k);$$

$$V_{N-1}^k = \frac{1}{k_2} (-6hf_{2N}^{k-1} - k_4 V_{N-3}^{k-1} + k_3 V_{N-2}^{k-1} + k_1 V_N^k);$$

$$V_N = V_*.$$

Перевагою застосування методу Зейделя є те, що процес ітерацій добре збігається, тобто число наближень, які необхідні для отримання розв'язку вихідної системи із заданою точністю, невелике, якщо елементи матриці малі по абсолютній величині. Бажано, щоб ітераційний процес не тільки збігався, але й збіжність мала монотонний характер, а не коливний [1-3].

Іншими словами, для успішної комп'ютерної реалізації ітераційного процесу модулі діагональних коефіцієнтів вихідної системи повинні мати перевагу, тобто бути більшими у порівнянні з модулями недіагональних коефіцієнтів цієї системи (вільні члени при цьому не беруться до уваги).

Не менш важливим етапом при проектуванні структури СКС, яка зосереджена на виробництві оболонкових конструкцій – є оцінка надійності кінцевого результату виробництва. При проведенні оцінки надійності, важливо враховувати початкові характеристики для моделюючої системи оболонок, а також здійснювати аналіз роботи наведеної розрахункової схеми та її складових компонент, оскільки вони мають безпосередній вплив на результативність роботи системи.

При незадовільному результаті оцінки надійності системи, необхідно скомпонувати множину розрахункових погрішностей її елементів та сформувати логічну схему взаємозв'язків між ними. Такого роду множина, дає потрібну характеристику для проведення подальшого дослідження та числового визначення параметрів логічної схеми. Відмітимо, що якісна характеристика надійності вихідної комп'ютерної системи, можлива за умови успішної працездатності компонентів логічної схеми.

Числові значення необхідних параметрів та коефіцієнтів логічної схеми представляються завдяки апаратній частині СКС, а саме блоку вимірювальної системи контролю за станом досліджуваного об'єкта.

Беззаперечними перевагами використання СКС є, те що вони слугують засобом для випробування в тестовому режимі новітніх методів для роботи з інформаційними даними, в основу яких закладені математичні розрахункові схеми. Відомі підходи, такі як: розпаралелювання, вирішення задач у просторовій постановці перед тим як використовуватися в КС були детально перевірені в СКС. Також до переваг можна віднести здатність оптимізаційних методів досліджувати СКС та виявляти недоліки і відслідковувати зв'язки між параметрами вихідної задачі, з метою проведення оцінки ефективності роботи СКС в тому чи іншому напрямі.

Інакше кажучи при проектуванні та створенні СКС перед розробником стоїть задача створити КС,

яка буде призначена для вирішення оптимізованих, різнопланових задач, які входять до вузького класу задач. СКС дає змогу отримати у числовій формі значення розподілу для таких полів, як: температурне, переміщення, деформації, напружень та ін.

Такого роду інформаційні дані в подальшому використовуються для проведення оцінки на міцність, жорсткість, довговічність елементів конструкції.

Висновки

У статті пропонується новий підхід до проектування структури СКС, яка призначена для моделювання тонкостінних циліндричних оболонок та розрахунку механічних характеристик задач пружно-деформованого стану оболонкових конструкцій змінної товщини із підвищеною точністю.

Запропонована структура СКС полягає у використанні скінченно-різницевої апроксимації

похідних. Представлений алгоритм розрахунку аналітичного подання моделі тонкостінної циліндричної оболонки, який передбачає відшукання розв'язку СЛАЕ із використанням комбінованих ітераційних методів. Значною перевагою методу є те, що можна отримати результати максимально наближені до точних за рахунок дискретного подання апроксимації.

Таким чином, можна стверджувати, що результати використання математичних методів для оптимізації роботи СКС полягають у використанні великомасштабних ітераційних процедур, які представляються у вигляді комбінованих методів, які оцінюють якість та надійність вихідних даних.

Успішна реалізація роботи СКС відкриє нові перспективи для використання розрахунків при виробництві тонкостінних циліндричних оболонкових конструкцій, які володіють надважливими властивостями на міцність, жорсткість, стійкість тощо.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Berikelashvili G. Construction and Analysis of Difference Schemes for Some Elliptic Problems and Consistent Estimates of the Rate of convergence / G. Berikelashvili. — Tbilisi.: Mathematical Institute Georgian Academy of Sciences, 2006. — 1–131 p.
2. Grigorenko A.Ya., Vlaikov G.G. Some problems of elasticity theory for anisotropic bodies of cylindrical form A. Ya. Grigorenko, G. G. Vlaikov. — Kyiv. National Academy of Sciences of Ukraine, S.P. Timoshenko Institute of Mechanics, Technical Center. 2002. — 217 p.
3. Григоренко Я. М., Влайков Г. Г., Григоренко А. Я. Численно-аналитическое решение задач механики оболочек на основе различных моделей. — Киев: Академперіодика, 2006. — 472 с.
4. Николайчук Я.М., Возна Н.Я., Пітух І.Р. Проектування спеціалізованих комп'ютерних систем. / Навчальний посібник/ – Тернопіль : ТЗОВ «Терно-граф», 2010. – 392 с., іл.
5. Mozhaev O. Multiservice network security metric / O. Mozhaev, H. Kuchuk, N. Kuchuk, M. Mozhaev, M. Lohvynenco // IEEE Advanced information and communication technologies-2017. Proc. of the 2th Int. Conf. – Lviv, 2017. – P. 133-136. – DOI: <https://doi.org/10.1109/AIACT.2017.8020083>
6. Svyrydov, A., Kuchuk, H., Tsiapa, O. (2018), "Improving efficiency of image recognition process: Approach and case study", Proceedings of 2018 IEEE 9th International Conference on Dependable Systems, Services and Technologies, DESSERT 2018, pp. 593-597, DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/DESSERT.2018.8409201>
7. Коваленко А.А. Использование временных шкал при аппроксимации длины очередей компьютерных сетей / А.А. Коваленко, Г.А. Кучук, И.В. Рубан // Сучасний стан наукових досліджень та технологій в промисловості. – 2018. – № 2 (4). – С. 12–18. – DOI: <http://doi.org/10.30837/2522-9818.2018.4.012>
8. Kuchuk N. Method for calculating of R-learning traffic peakedness / N. Kuchuk; O. Mozhaev, M. Mozhaiev; H. Kuchuk // 2017 4th International Scientific-Practical Conference Problems of Infocommunications Science and Technology, PIC S and T 2017. – 2017. – P. 359 – 362. URL : <http://dx.doi.org/10.1109/INFOCOMMST.2017.8246416>
9. Рудаков К. М. Чисельні методи аналізу в динаміці та міцності конструкцій. – К: Навч. Посібник. – К.: НТУУ «КПІ», 2007. – 379 с.
10. Рудницький В.М., Бабенко В.Г. Математичне моделювання дискретних пристроїв для систем інформаційної безпеки. Міжнародна науково-технічна конференція «Інтегровані комп'ютерні технології в машинобудуванні ІКТМ-2007». Харків: НАУ ім. М.С. Жуковського «Харківський авіаційний інститут», 2007. С. 227-229.

Received (Надійшла) 11.12.2019

Accepted for publication (Прийнята до друку) 29.01.2020

Specialized computer system for calculating with increased accuracy the mechanical characteristics of stress-strain state problems of thin-walled cylindrical shells of variable thickness

V. Rudnitsky, V. Dzyuba

Abstract. The article proposes the latest approach to building a specialized computer system (SCS) based on a thorough analysis of the task, taking into account the joint work of the shell with the internal filler, boundary conditions, and the properties of a thin-walled cylindrical shell under load, and at the same time is able to save the original data. A review of literary sources on the subject of the article. The necessity of creating SCS as a successful alternative to traditional computer systems is substantiated, since the combination of hardware and software together with mechanical or other parts makes it possible to find solutions to a wide class of applied problems. The general requirements to the structure of SCS, which is designed to solve current problems in the mechanics of a deformable solid, are formulated. A detailed algorithm for the operation of the calculation unit with increased accuracy of SCS, which is reduced to solving SLAE using iterative methods, namely the Seidel method.

Keywords: specialized computer system, thin-walled cylindrical shell, boundary value problem, algorithm, Seidel method, iterative scheme, matrix, method convergence.