

УДК 004.942

Самодєлок Р.В.

Інститут проблем безпеки
атомних електростанцій НАН України

Любицький О.В.

Інститут проблем безпеки атомних
електростанцій НАН України

ВИКОРИСТАННЯ МЕТОДУ СКІНЧЕННИХ ЕЛЕМЕНТІВ У ПОБУДОВІ МОДЕЛЕЙ НА ПЛАТФОРМІ «3DS MAX»

Проведено аналіз сфер застосування чисельних методів моделювання деформації сітчастих тривимірних структур, як-то проведення фізичного експерименту «in silico», обчислення в галузі інженерних наук та комп'ютерна візуалізація динамічних процесів. У результаті аналізу виявлено, що основою створення методології моделювання є визначення оптимального співвідношення між точністю моделі та ресурсоемності алгоритмів. Показано, що моделювання деформації може відбуватися у режимі реального часу за умови накладання обмежень на обчислювальний ресурс апаратної платформи програмного забезпечення, водночас воно має забезпечувати достатню точність обчислень. Показана можливість реалізації такого алгоритму у середовищі «Autodesk 3ds Max» і пакеті прикладних програм для числового аналізу. Зазначено, що різниця реалізації лінійного та нелінійного методу, що зростає з ростом вузлової сили, функція нелінійного методу скінченних елементів при цьому наближається до квадратичної. Також продемонстровано збіжність методу дотичних для нелінійного методу скінченних елементів.

Ключові слова: модель деформації, тетраедральний елемент, матриця жорсткості, метод скінченних елементів, нелінійна модель, «3ds Max».

Постановка проблеми. Моделювання деформацій сітчастих тривимірних структур має широку галузь застосування, воно використовується для аналізу та візуалізації процесів у різних сферах фізики (механіка, термодинаміка, гідродинаміка тощо), підготовці краш-тестів, створенні хірургічних тренажерів, комп'ютерній анімації та комп'ютерних іграх [1-6], зокрема таких, що будуються у програмному пакеті “Autodesk 3ds Max”, для якого буде проведено подальше моделювання. Основою створення методології моделювання деформацій є визначення оптимального співвідношення між точністю розробленої моделі та ресурсоемності алгоритмів.

Моделювання часто відбувається у режимі реального часу, при цьому обчислювальний ресурс апаратної платформи може бути суттєво обмежений, тому що програмне забезпечення (ПЗ) має використовуватися широким загалом користувачів. При цьому практика використання моделей деформацій сітчастих тривимірних структур показує, що лінійні методи, що характеризуються меншою ресурсоемністю, не забезпечують достатню точність обчислень.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. У процесі роботи було проведено аналіз сучас-

них публікацій, присвячених моделюванню деформацій та використання чисельних методів у галузі фізики, інженерних наук та структурного аналізу [2; 5–7; 10]. У результаті було запропоновано метод швидкого розрахунку матриць жорсткості для методу скінченних елементів через розширення моделі лінійної деформації до деформації Гріна Лагранжа.

Постановка завдання. Мета статті – проаналізувати сфери застосування чисельних методів моделювання деформацій сітчастих тривимірних структур, як-то проведення фізичного експерименту «in silico», обчислення в галузі інженерних наук та комп'ютерна візуалізація динамічних процесів. Показати можливість реалізації такого алгоритму у середовищі “Autodesk 3ds Max” і пакеті прикладних програм для числового аналізу. Розкрити збіжність методу дотичних для нелінійного методу скінченних елементів.

Виклад основного матеріалу. Моделювання деформацій може відбуватися у режимі реального часу за умови накладання обмежень на обчислювальний ресурс апаратної платформи програмного забезпечення, водночас воно має забезпечувати достатню точність обчислень.

Таблиця 1

Визначення значень $\alpha_i, \beta_i, \gamma_i$ і δ_i через координати x_i, y_i і z_i

i	1	2	3	4
α_i	$\begin{vmatrix} x_2 & y_2 & z_2 \\ x_3 & y_3 & z_3 \\ x_4 & y_4 & z_4 \end{vmatrix}$	$\begin{vmatrix} x_1 & y_1 & z_1 \\ x_3 & y_3 & z_3 \\ x_4 & y_4 & z_4 \end{vmatrix}$	$\begin{vmatrix} x_1 & y_1 & z_1 \\ x_2 & y_2 & z_2 \\ x_4 & y_4 & z_4 \end{vmatrix}$	$\begin{vmatrix} x_1 & y_1 & z_1 \\ x_2 & y_2 & z_2 \\ x_3 & y_3 & z_3 \end{vmatrix}$
β_i	$\begin{vmatrix} 1 & y_2 & z_2 \\ 1 & y_3 & z_3 \\ 1 & y_4 & z_4 \end{vmatrix}$	$\begin{vmatrix} 1 & y_1 & z_1 \\ 1 & y_3 & z_3 \\ 1 & y_4 & z_4 \end{vmatrix}$	$\begin{vmatrix} 1 & y_1 & z_1 \\ 1 & y_2 & z_2 \\ 1 & y_4 & z_4 \end{vmatrix}$	$\begin{vmatrix} 1 & y_1 & z_1 \\ 1 & y_2 & z_2 \\ 1 & y_3 & z_3 \end{vmatrix}$
γ_i	$\begin{vmatrix} 1 & x_2 & z_2 \\ 1 & x_3 & z_3 \\ 1 & x_4 & z_4 \end{vmatrix}$	$\begin{vmatrix} 1 & x_1 & z_1 \\ 1 & x_3 & z_3 \\ 1 & x_4 & z_4 \end{vmatrix}$	$\begin{vmatrix} 1 & x_1 & z_1 \\ 1 & x_2 & z_2 \\ 1 & x_4 & z_4 \end{vmatrix}$	$\begin{vmatrix} 1 & x_1 & z_1 \\ 1 & x_2 & z_2 \\ 1 & x_3 & z_3 \end{vmatrix}$
δ_i	$\begin{vmatrix} 1 & x_2 & y_2 \\ 1 & x_3 & y_3 \\ 1 & x_4 & y_4 \end{vmatrix}$	$\begin{vmatrix} 1 & x_1 & y_1 \\ 1 & x_3 & y_3 \\ 1 & x_4 & y_4 \end{vmatrix}$	$\begin{vmatrix} 1 & x_1 & y_1 \\ 1 & x_2 & y_2 \\ 1 & x_4 & y_4 \end{vmatrix}$	$\begin{vmatrix} 1 & x_1 & y_1 \\ 1 & x_2 & y_2 \\ 1 & x_3 & y_3 \end{vmatrix}$

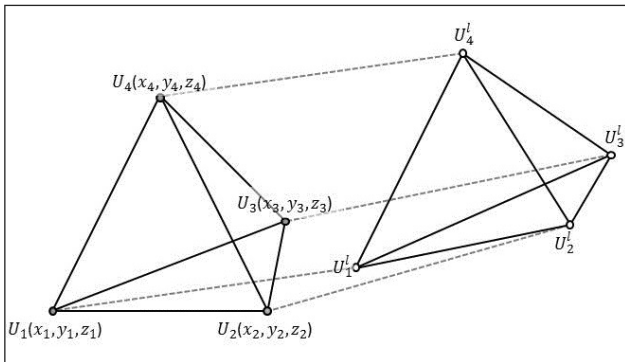


Рис. 1. Математична модель деформації тетрадрального елемента сітчастої 3D структури у разі деформації об'єкта, що моделюється

1. Математичне моделювання деформації сітчастої структури.

Як базовий елемент сітчастої 3D-структури у рамках цієї роботи пропонується використовувати найбільш простий елемент – тетраедр, що характеризується повним набором координат чотирьох точок у тривимірному просторі, і, таким чином, може бути описаний набором змінних $U_i(x,y,z)$, де $i=4$. Деформація тривимірної моделі у математичному вигляді може бути описана як перехід від матриці U (рис. 1) до матриці U_i (l: linear function displacement) через функцію $C(c_1, c_2, c_3, c_4)$:

$$U(x,y,z)=C(U(x,y,z)= c_1+c_2x+c_3y+c_4z \quad (1)$$

Координати окремої вершини тетраедра при цьому можуть бути визначені [5–7]:

$$U_i^l(x,y,z) = \begin{pmatrix} U_1^l \\ U_2^l \\ U_3^l \\ U_4^l \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} U_1 \\ U_2 \\ U_3 \\ U_4 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} c_1 \\ c_2 \\ c_3 \\ c_4 \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & x_1 & y_1 & z_1 \\ 1 & x_2 & y_2 & z_2 \\ 1 & x_3 & y_3 & z_3 \\ 1 & x_4 & y_4 & z_4 \end{bmatrix} \cdot \begin{pmatrix} c_1 \\ c_2 \\ c_3 \\ c_4 \end{pmatrix} \quad (2)$$

Таким чином, c_n можна визначити через U_n як $c_n=Y \cdot U_n$, причому Y описується через співвідношення наборів значень $\alpha_i, \beta_i, \gamma_i$ і δ_i , представлених у вигляді матриці та об'єму тетраедра V :

$$\begin{pmatrix} c_1 \\ c_2 \\ c_3 \\ c_4 \end{pmatrix} = \frac{1}{6V} \begin{bmatrix} \alpha_1 & \alpha_2 & \alpha_3 & \alpha_4 \\ \beta_1 & \beta_2 & \beta_3 & \beta_4 \\ \gamma_1 & \gamma_2 & \gamma_3 & \gamma_4 \\ \delta_1 & \delta_2 & \delta_3 & \delta_4 \end{bmatrix} \cdot \begin{pmatrix} U_1 \\ U_2 \\ U_3 \\ U_4 \end{pmatrix} \quad (3)$$

Відповідно, U^l може бути визначена через об'єм деформованого тетрадрального елемента V :

$$U_i^l(x,y,z) = \frac{1}{6V^l} [1 \ x \ y \ z] \cdot \begin{bmatrix} \alpha_1 & \alpha_2 & \alpha_3 & \alpha_4 \\ \beta_1 & \beta_2 & \beta_3 & \beta_4 \\ \gamma_1 & \gamma_2 & \gamma_3 & \gamma_4 \\ \delta_1 & \delta_2 & \delta_3 & \delta_4 \end{bmatrix} \cdot \begin{pmatrix} U_1 \\ U_2 \\ U_3 \\ U_4 \end{pmatrix} \quad (4)$$

Очевидно, складники матриці $\alpha_i, \beta_i, \gamma_i$ і δ_i визначаються через координати x_i, y_i і z_i (табл. 1).

Водночас об'єм тетрадрального елемента може бути визначено:

$$V = \frac{1}{6} \begin{vmatrix} 1 & x_i & y_i & z_i \\ 1 & x_j & y_j & z_j \\ 1 & x_n & y_n & z_n \\ 1 & x_k & y_k & z_k \end{vmatrix} \quad (5)$$

Надалі з метою отримання формул для розрахунку ефекту деформації рівняння (4) можна переписати:

$$U_i^l = \frac{1}{6V^l} \begin{pmatrix} \alpha_1 + \beta_1x + \gamma_1y + \delta_1z \\ \alpha_2 + \beta_2x + \gamma_2y + \delta_2z \\ \alpha_3 + \beta_3x + \gamma_3y + \delta_3z \\ \alpha_4 + \beta_4x + \gamma_4y + \delta_4z \end{pmatrix} \times [u_1, u_2, u_3, u_4] \quad (6)$$

Рівняння (6) вказує на можливість спрощення математичного опису тетрадрального елемента, замість чотирьох наборів змінних $\alpha_i, \beta_i, \gamma_i$ і δ_i можна ввести один набір ϵ_i :

$$\begin{cases} \varepsilon_1 = \frac{1}{6V} (\alpha_1 + \beta_1 x + \gamma_1 y + \delta_1 z) \cdot u_1 \\ \varepsilon_2 = \frac{1}{6V} (\alpha_2 + \beta_2 x + \gamma_2 y + \delta_2 z) \cdot u_2 \\ \varepsilon_3 = \frac{1}{6V} (\alpha_3 + \beta_3 x + \gamma_3 y + \delta_3 z) \cdot u_3 \\ \varepsilon_4 = \frac{1}{6V} (\alpha_4 + \beta_4 x + \gamma_4 y + \delta_4 z) \cdot u_4 \end{cases} \quad (7)$$

Метод, що пропонується використовувати у рамках цієї роботи, базується на виведенні матриць жорсткості через великі деформації Гріна-Лагранжа, що можна розглядати як розширення теорії нескінченно малих деформацій, за якого не виключаються з розгляду нелінійні члени.

2. Застосування методу скінченних елементів та моделі деформації Гріна-Лагранжа. Запропонована нелінійна модель методу скінченних елементів (FEM: Finite Element Method) використовує лінійну структуру, що не вимагає використання вагових функцій та диференціальних рівнянь, а отже, у розрахунку задачі немає необхідності у використанні чисельних методів інтегрування, що значно зменшує ресурсоемність апаратної платформи.

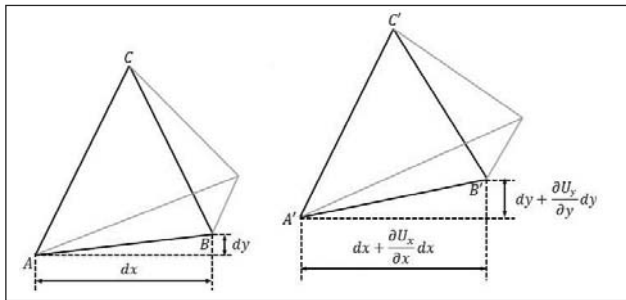


Рис. 2. Математичне моделювання деформації ребра грані тетраедрального елемента сітчастої 3D структури

Замість вагових функцій та інтегрального обчислення у цьому разі пропонується застосувати градієнти зміщення та деформації, це дає змогу змоделювати просторово незалежну матрицю елементарної жорсткості і таким чином розширити лінійний FEM до нелінійного FEM через розширення моделі лінійної деформації до деформації Гріна-Лагранжа.

Очевидно, що розробка цього методу моделювання деформацій тривимірних об'єктів вимагає переходу від 2D-FEM, що широко представлено у літературних джерелах [4–7], до 3D-FEM. На рис. 2 моделювання деформації показано на прикладі розрахунку для ребра однієї з граней тетраедрального елемента, трансформації відрізка $AB \rightarrow A'B'$:

$$\Delta_x = \frac{|A'B'| - |AB|}{|AB|} \quad (8)$$

Довжина відрізка може бути визначена:

$$|A'B'| = \sqrt{\left(dx + \frac{\partial U_x}{\partial x} dx\right)^2 + \left(dy + \frac{\partial U_y}{\partial y} dy\right)^2} \quad (9)$$

Якщо знехтувати членами високого порядку, трансформацію 2D-об'єкта на рівні нескінченно малих деформацій можна визначити як:

$$\begin{cases} \Delta_{xx} = \frac{\partial U_x}{\partial x} \\ \Delta_{yy} = \frac{\partial U_y}{\partial y} \\ \Delta_{xy} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial U_x}{\partial x} + \frac{\partial U_y}{\partial y} \right) \end{cases} \quad (10)$$

Подальший розвиток моделі і проведення нелінійного FEM-аналізу необхідно включити до розгляду членів високого порядку. Лінійний FEM-аналіз базується на припущеній нескінченно малого зсуву вздовж осей x, y, z , тоді як для великих деформацій слід розрізняти початкові та кінцеві координати елементів сітчастої структури. Для 3D-деформацій слід ввести члени високого порядку η_{ij} (табл. 2).

Тензор деформації Гріна-Лагранжа у матричному представленні:

$$\{\eta\} = \frac{\{d\}^T \cdot [B_{NL}] \cdot \{d\}}{2} + [B_L^T] \cdot \{d\}, \quad (11)$$

де $\{d\}$ характеризує зсув вузла елемента сітчастої структури 3D-моделі (відповідно, $\{d\}^T$ – транспонований вектор $\{d\}$), $[B_{NL}]$ – нелінійна частина матриці вузлів $[B_0]$, а $[B_L]$ – лінійна частина).

Таблиця 2

Визначення високого порядку η_{ij} для $i \in \{x, y, z\}$ та $j \in \{x, y, z\}$

η_{ij}	Члени високого порядку 3D-деформації
η_{xx}	$\frac{\partial U_x}{\partial x} + \frac{1}{2} \left[\left(\frac{\partial U_x}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial U_x}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial U_x}{\partial x} \right)^2 \right]$
η_{yy}	$\frac{\partial U_y}{\partial y} + \frac{1}{2} \left[\left(\frac{\partial U_x}{\partial y} \right)^2 + \left(\frac{\partial U_x}{\partial y} \right)^2 + \left(\frac{\partial U_x}{\partial y} \right)^2 \right]$
η_{zz}	$\frac{\partial U_z}{\partial z} + \frac{1}{2} \left[\left(\frac{\partial U_x}{\partial z} \right)^2 + \left(\frac{\partial U_x}{\partial z} \right)^2 + \left(\frac{\partial U_x}{\partial z} \right)^2 \right]$
$\eta_{xy} = \eta_{yx}$	$\frac{1}{2} \left(\frac{\partial U_x}{\partial y} + \frac{\partial U_y}{\partial x} \right) + \frac{1}{2} \left[\frac{\partial U_x}{\partial x} \frac{\partial U_x}{\partial y} + \frac{\partial U_y}{\partial x} \frac{\partial U_y}{\partial y} + \frac{\partial U_z}{\partial x} \frac{\partial U_z}{\partial y} \right]$
$\eta_{yz} = \eta_{zy}$	$\frac{1}{2} \left(\frac{\partial U_z}{\partial y} + \frac{\partial U_y}{\partial z} \right) + \frac{1}{2} \left[\frac{\partial U_x}{\partial y} \frac{\partial U_x}{\partial z} + \frac{\partial U_y}{\partial y} \frac{\partial U_y}{\partial z} + \frac{\partial U_z}{\partial z} \frac{\partial U_z}{\partial y} \right]$
$\eta_{xz} = \eta_{zx}$	$\frac{1}{2} \left(\frac{\partial U_x}{\partial z} + \frac{\partial U_z}{\partial x} \right) + \frac{1}{2} \left[\frac{\partial U_x}{\partial x} \frac{\partial U_x}{\partial z} + \frac{\partial U_y}{\partial x} \frac{\partial U_y}{\partial z} + \frac{\partial U_z}{\partial x} \frac{\partial U_z}{\partial z} \right]$

Для окремого тетраедрального елемента $[B_{NL}]$ і $[B_L]$ є константами відповідно до лінійного

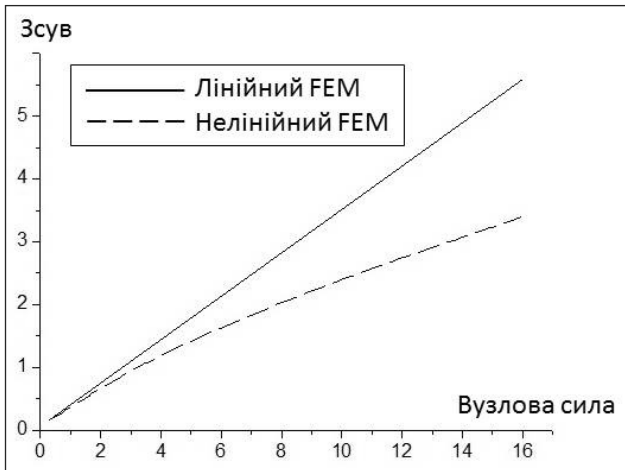


Рис. 3. Залежність зсуву від вузлової сили для лінійного та нелінійного FEM

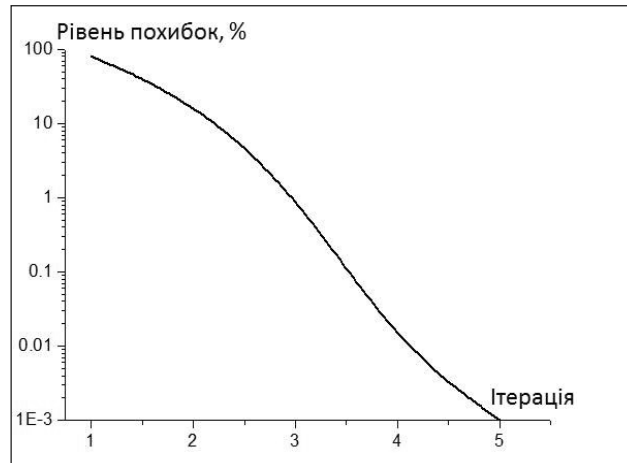


Рис. 4. Графік збіжності методу дотичних для нелінійного FEM

FEM-аналізу. Але якщо включити у аналіз зміну вектора $\{d\}$, рівняння (11) можна записати так:

$$\{\bar{\eta}\} = \{d\}^T \cdot [B_{NL}] \cdot \{d\} + [B_L^T] \cdot \{d\}. \quad (12)$$

Остаточно аналіз деформації сітчастої структури 3D-моделі, що включає всі тетрадральні елементи ($\{\eta\} = [B_0] \cdot \{d\}, \{\bar{\eta}\} = [\bar{B}_0] \cdot \{d\}$):

$$\begin{cases} \{\eta\} = \left(\frac{\{d\}^T \cdot [B_{NL}]}{2} + [B_L^T] \right) \cdot \{d\} \\ \{\bar{\eta}\} = (\{d\}^T \cdot [B_{NL}] + [B_L^T]) \cdot \{d\} \end{cases} \quad (13)$$

При цьому складник $[B_L]$ нелінійного FEM-аналізу відповідатиме аналогічному складнику лінійного FEM-аналізу.

Таким чином, на основі матриці вузлів $[B_0]$ та матриці секунтних зв'язків $[E]$ можна визначити матрицю жорсткості окремого елемента $[k(U)]$ і далі спростити рівняння, враховуючи, що для тетрадрального елемента $[B_0]$, $[E]$ та $[\bar{B}_0]$ є константами:

$$\begin{aligned} [k(U)] &= \iiint \{d\}^T [B_0]^T [E] [\bar{B}_0] \{d\} dx dy dz = \\ &= \{d\}^T [B_0]^T [E] [\bar{B}_0] \mathcal{V}. \end{aligned} \quad (14)$$

Тоді вузлові сили у деформованому елементі можна визначити як через зсув вузла елемента, так і через матрицю координат:

$$f^i = k_s^i(d) \{d\}^i = k_s^i(U) U^i, \quad (15)$$

де $k_s^i()$ – секундна матриця жорсткості.

У результаті функції нелінійного переміщення можна отримати шляхом використання методу дотичних (метод Ньютона-Рафсона).

Аналіз результатів моделювання. Розроблений алгоритм нелінійного FEM найбільш ефективно реалізується і візуалізується у середовищі “3DS Max” і пакета прикладних програм для числового аналізу [8–10]. При цьому можна

визначити табличні дані лінійних властивостей матеріалів для моделей. У цій роботі використано 1 ГПа для модуля Юнга, що є близьким для поліпропілену і 0,25 для коефіцієнта Пуассона, який ми використовували. У наборі проведених експериментів кожен мав різну кількість елементів для спостереження за прискоренням для обчислення матриць жорсткості та для рішення системи. На рис. 3 показана різниця реалізації лінійного та нелінійного методу, що зростає з ростом вузлової сили, функція нелінійного FEM при цьому наближається до квадратичної.

На рис. 4 показано збіжність методу дотичних для нелінійного FEM, при цьому рівень похибок представлено в логарифмічному масштабі.

Таким чином, запропонований метод розрахунку матриць жорсткості для нелінійного FEM дає змогу збільшити точність аналізу та його швидкість у побудові матриць елементарної жорсткості. Запропонований метод показує 2-3 більшу швидкість в обчисленні матриць жорсткості і на 1,1-1,2 більшу швидкість обчислення всієї сітчастої структури, ніж типові методи, що використовуються для розрахунку подібних задач, як-то, наприклад, метод Педерсена.

Висновки. Проведено аналіз чисельних методів моделювання деформацій сітчастих тривимірних структур. Виявлено, що основою створення методології моделювання є визначення оптимального співвідношення між точністю моделі та ресурсомності алгоритмів. Моделювання деформацій має відбуватися у режимі реального часу за умови жорстких обмежень обчислювального ресурсу. Для побудови моделі було запропоновано використовувати тетрадральний базовий елемент як основу

сітчастої тривимірної структури; метод, що було розроблено у рамках цієї роботи, базується на виведенні матриць жорсткості через великі деформації Гріна-Лагранжа. Запропоновано нелінійну модель методу скінченних елементів, що містить у своїй основі лінійну структуру та градієнти зміщення і

деформацій. Показана можливість реалізації такого алгоритму у середовищі “Autodesk 3DS Max” і пакеті прикладних програм для числового аналізу. Продемонстровано збіжність методу дотичних для розробленого нелінійного методу скінченних елементів.

Список літератури:

1. The Finite Element Method for Fluid Dynamics. (2014). The Finite Element Method for Fluid Dynamics, Iii. DOI:10.1016/b978-1-85617-635-4.00018-2.
2. G.R. Joldes, A. Wittek, and K. Miller, “Real-timenonlinear finite element computations on GPU: application to neurosurgical simulation”. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, vol. 199, no. 49–52, pp. 3305–3314, 2010.
3. Rao S.S. (2011). MATLAB Programs for Finite Element Analysis. The Finite Element Method in Engineering, pp. 683–704. DOI:10.1016/b978-1-85617-661-3.00023-4.
4. Huthwaite P., & Lowe M.J. (2014). High speed finite element simulations on the graphics card. DOI:10.1063/1.4865070.
5. Extended Finite Element Formulation. (2014). Extended Finite Element Method, 31–76. DOI:10.1002/9781118869673.ch2.
6. Matrix Presentation of the Finite Element Method. (2013). Finite Element Method, 231–343. DOI:10.1002/9781118569764.ch4.
7. D.L. Logan. A First Course in the Finite Element Method, Cengage Learning, 5th edition, 2012.
8. Autodesk, “3ds Max – 3D Modeling, Animation, and Rendering Software”. 2012, URL: <http://www.autodesk.com/products/autodesk-3ds-max/>.
9. E. Madenci and I. Guven. The Finite Element Method and Applications in Engineering Using ANSYS, Springer, Berlin, Germany, 1st edition, 2006.
10. Maplesoft, “MATLAB Connectivity – Maple Features”. 2012, URL: <http://www.maplesoft.com/products/maple/features/matlabconnectivity.aspx>

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МЕТОДА КОНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ПРИ ПОСТРОЕНИИ МОДЕЛЕЙ НА ПЛАТФОРМЕ «3DS MAX»

Проведен анализ областей применения численных методов моделирования деформаций сетчатых трехмерных структур, таких как проведение физического эксперимента «insilico», вычисления в области инженерных наук и компьютерная визуализация динамических процессов. В результате анализа определено, что основой для создания методологии моделирования является определение оптимального соотношения между точностью модели и ресурсоемкости алгоритмов. Показано, что моделирование деформаций может происходить в режиме реального времени при наложении ограничений на вычислительный ресурс аппаратной платформы программного обеспечения, в то же время оно должно обеспечивать достаточную точность вычислений. Показана возможность реализации данного алгоритма в среде “Autodesk 3ds Max” и пакете прикладных программ для численного анализа. Отмечено, что разница реализации линейного и нелинейного метода растет с ростом узловой силы, функция нелинейного метода конечных элементов при этом приближается к квадратичной. Также продемонстрировано сходимость метода касательных для нелинейного метода конечных элементов.

Ключевые слова: модель деформации, тетраэдральный элемент, матрица жесткости, метод конечных элементов, нелинейная модель, “3ds Max”.

APPLICATION OF THE FINITE ELEMENT METHOD OF THE 3DS MAX MODELS

The analysis of the areas of numerical methods application for modeling deformations of mesh three-dimensional structures, such as the physical experiment “in silico”, calculations in the field of engineering sciences and computer visualization of dynamic processes was done. As a result of the analysis, it is determined that the basis for development a modeling methodology is to determine the optimal relationship between the accuracy of the model and the resource intensity of the algorithms. It is shown that the modeling of deformations can occur in real time mode while imposing limitations on the computational resource of the hardware platform of the software, at the same time, it should provide sufficient accuracy of the calculations. The possibility of implementing this algorithm in the environment of “Autodesk 3ds Max” and a package of applied programs for numerical analysis is shown. It is noted that the difference in the implementation of the linear and nonlinear method increases with the growth of the nodal force, and the function of the nonlinear finite element method approaches the quadratic one. The convergence of the tangent method for the nonlinear finite element method is also demonstrated.

Key words: deformation model, tetrahedral element, stiffness matrix, finite element method, nonlinear model, “3ds Max”.