DOI: https://doi.org/10.32347/2707-501x.2022.49(1).49-58

УДК 631.31:631.431

В.І. Доненко,
докт. техн. наук, професор
ORCID: 0000-0002-5728-5081
О.А. Овчаренко,
канд. техн. наук, доцент
ORCID: 0000-0003-1906-7021
Луганський національний аграрний університет, м. Дніпро

РОЗРОБКА ПРОСТОРОВОЇ МОДЕЛІ КРИХКОГО СЕРЕДОВИЩА ДЛЯ ОПИСАННЯ ПРОЦЕСІВ ЗА МЕЖАМИ НЕСУЧОЇ ЗДАТНОСТІ ТІЛ

Існуючі моделі тіл ґрунтуються на умові суцільності матеріалу з якого вони виготовлені. При цьому існують задачі, які суперечать цієї умови. Наприклад, моделювання обрушення будівлі, моделювання процесу роботи землерийних машин. Такі задачі потребують використання дискретних моделей, які не спираються на суцільність. Цікавою моделлю є модель пружних об'єктів в комп'ютерних іграх, яка складається з пружних в'язей, що з'єднуються у вузлах. Таким чином утворюється своєрідна просторова ферма. Якщо маси зосередити у вузлах, ввівши додатково обмежуючі сфери для контактного розрахунку, з'являється можливість моделювання процесу руйнування конструкції через знищення в'язей в покроковому розрахунку. Недоліком цієї моделі є відсутність теоретичного обґрунтування з зосередженням на візуальній та ресурсній ефективності.

Подібну стержньову апроксимацію пружних тіл, ще у 1956 році запропонував професор О.Р. Ржаніцин. В своїх роботах він розглядав плоску пластину, врахувавши значення пружних характеристик тіла через характеристики стержнів структури. Його ідеї не знайшли широкого розвитку у зв'язку з відсутністю технічних можливостей подібного розрахунку. Крім того метод скінченних елементів виявився більш ефективнішим. В наш час з'явилися технічні можливості, а метод скінченних елементів, ефективно працюючи на суцільних тілах, має обмежені можливості у задачах руйнування тіл.

Підвищити якість отриманих результатів при стержневій апроксимації можна перейшовши до кластерної моделі, в якої вся структура розглядається як сукупність кластерів. Для простих форм та навантажень такий підхід дозволяє знизити похибку до нуля. Але ці дослідження виконані лише для плоскої задачі.

Просторові тіла також можна апроксимувати за допомогою стержньових кластерів. Для обґрунтування такого підходу розглядається робота одного кластера: рівновага вузла та стержнів, що приєднуються до цього вузла. Це дає можливість визначити залежність деформацій кластера від жорсткості його стержнів. Прирівнявши деформації кластера та деформацію об'ємного тіла, яке описує цей кластер, встановлене значення жорсткості стержнів, що забезпечуватимуть пружні характеристики реального тіла.

Ключові слова: моделювання, крихке середовище, дискретна модель, стержньова апроксимація, модель мас та в'язей.

Вступ. В основі будь-якого проєкту знаходяться розрахунки. Вони можуть стосуватися процесу або конструкції, в будь-якому разі якість отриманих результатів залежить від багатьох факторів, починаючи з кваліфікації проєктувальника, методів, що він використовує та закінчуючи технічними можливостями обладнання. Одним з найбільш критичних елементів є можливості моделей середовищ, на яких базуються розрахунки. При цьому вони не повинні досконально описувати абсолютно всі властивості об’єктів, що проєктуються. Кожна модель має своє призначення, описує окрему поведінку, конкретний бік фізичного тіла або процесу. Маючи при цьому сильні та слабкі сторони вона повинна виконувати поставлене перед нею вузьке завдання. Такий підхід призводить по-перше до великого різноманіття моделей, а по-друге до можливості та необхідності їх постійного вдосконалення. Таким чином, найкоротший шлях до покращення результатів проєктування полягає у розвитку базових моделей.

Сучасні дослідження забезпечують стрімкий прогрес у вдосконаленні математичних моделей середовищ, суттєвим поштовхом у цьому стала можливість чисельного розв’язання складних диференційних рівнянь за допомогою інформаційних технологій. При цьому цей розвиток обмежується станом об’єктів моделювання до їх руйнування. У випадку пластичних матеріалів цей підхід повністю виправданий, оскільки тут руйнуванням вважається досягнення границі плинності та не призводить до порушення суцільності матеріалу, який переходить до нелінійного стану. Однак крихкі матеріали мають тенденцію до прогресуючого руйнування з повною втратою суцільності, що виходить за межі роботи математичних моделей середовищ. Так моделювання найбільш розповсюдженого крихкого будівельного матеріалу бетону, дуже розвинене. Його поведінка при опорі силовим впливам може описуватися багатьма моделями: силовими та деформаційними моделями, моделями інтегральних оцінок, квазісуцільними моделями, моделлю «пружних блоків», деформаційними моделями [1]. При цьому, не зважаючи на розвиненість та значне різноманіття підходів, моделювання обмежується повним або частковим збереженням суцільності середовища.

Таким чином, за межами залишається розв’язання задач пов’язаних з руйнуванням будівель та споруд. Разом з цим, збройна агресія Росії показала актуальність будівництва будівель, що не обрушаються від аварійних впливів або забезпечують безпеку їх мешканців, але для цього в моделюванні потрібно вийти за межі цілісності конструкцій. Ще один приклад – це ґрунтове середовище, моделі якого досить розвинені для розрахунку основ, але для землерийних машин вони дають значну похибку та показують дуже скромні можливості [2].

Таким чином, актуальним та цікавим є розвиток моделей крихких середовищ з можливістю моделювання в умовах прогресуючого руйнування та значної втрати суцільності.

Аналіз досліджень і публікацій.

Реалізація більшості моделей середовищ так чи інакше спираються на методи теорії пружності з обов’язковим виконанням умови зберігання нерозривності цього середовища. В той же час для моделювання процесів, пов’язаних з руйнуванням необхідно перейти до використання дискретних моделей. Найбільш розповсюджена дискретизація суцільного середовища виконується методом скінченних елементів. При цьому програмний комплекс Ansys дозволяє виконувати функцію «народження» та «смерті» скінченних елементів [3], яка може бути використана для моделювання поетапного будівництва. В умовах непередбачуваного руйнування такий підхід не спрацьовує, оскільки при постійному створенні нових контактних поверхонь задача значно ускладняється і не дає позитивного розв’язання. Крім того процес руйнування не передбачає знищення матеріалу, як у випадку зі «смертю» елементів.

Цікавим є метод дискретизації пружного об'єкта шарнірно-стержньовою конструкцією, який широко використовується для моделювання тіл, що деформуються у комп'ютерних іграх [4, 5]. Також цей метод використовують для моделювання тканин, додавши у шарнірні з'єднання в'язей сфери, в яких зосереджені маси. Саме ці сфери вступають в контакт з іншими тілами, моделюючі поведінку тканини. При використанні такої моделі в комп'ютерних іграх основним критерієм її ефективності є швидкість розрахунків. Точність вважається задовільною, якщо візуально розбіжність з реальними об'єктами не значна.

Зробивши модель тканини просторовою, її можна застосовувати для обчислення середовища з можливістю його руйнування [6] (рис. 1). В такій моделі сфери вступають у взаємодію з іншими тілами, передаючи зовнішнє навантаження на в'язі. У випадку перевищення допустимого значення деформацій або внутрішніх зусиль вони руйнуються та виключаються з розрахунку.

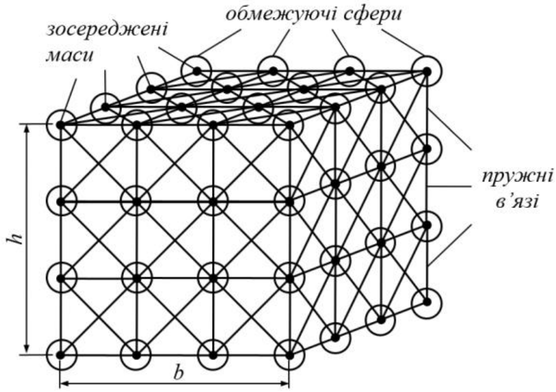

Рис. 1. Шарнірно-стержньова дискретизація суцільного середовища

Не зважаючи на те, що модель системи мас та пружних в'язей набула поширення саме зараз, з розвитком ігрової індустрії, ідея стержньової апроксимації суцільного тіла не нова. Її запропонував у 1956 році професор О.Р. Ржаніцин [7, 8] (рис. 2). Він отримав залежність коефіцієнта Пуассона μ та модуля пружності E тіла від жорсткості стержнів моделі апроксимації

$$\mu = \frac{E_2F_2/\sqrt{2}}{E_1F_1 + E_2F_2/\sqrt{2}} = \frac{\eta}{\sqrt{2}+\eta}, \tag{1}$$

$$E = (1-\mu^2)\frac{E_1F_1 + E_2F_2/\sqrt{2}}{a} = \frac{E_1F_1}{a}\frac{\sqrt{2}+2\eta}{\sqrt{2}+\eta}, \tag{2}$$

де E_1F_1 – жорсткість на стиск горизонтальних та вертикальних стержнів;
E_2F_2 – жорсткість на стиск діагональних стержнів;
η – відношення жорсткостей

$$\eta = \frac{E_2F_2}{E_1F_1}. \tag{3}$$

Також зроблений висновок, що при збільшені кількості комірок, структура буде еквівалентна плоскій ізотропній пластині, що зроблена з пружного матеріалу. При цьому розрахунки показують, що збільшення розмірності структури похибку зменшує, але повністю вона не зникає. Так пластина, що апроксимується структурою 4×8 комірок дає похибку 18,7%, збільшення щільності до 16×32 комірок зменшує похибку до 4,7 % [9].

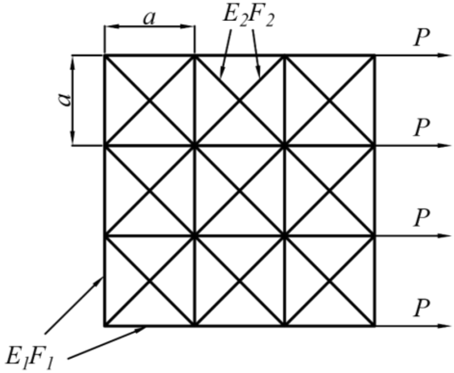

Рис. 2. Стержньова апроксимація професора О.Р. Ржаніцина

Вирішити проблему наявності похибки дозволяє перехід до кластерної структури [9] (Рис. 3). В ній кожна комірка представляє окремий кластер, а вся структура – це сукупність об’єднаних між собою кластерів. В цьому випадку результат не залежить від розмірності структури та знижує похибку до нуля. Крім зменшення похибки така модель, при встановленні у вузли обмежувальних сфер із зосередженими в їх центрах масами дозволяє описувати процеси руйнування крихких матеріалів. Для цього необхідно виконувати покроковий розрахунок, а кластери, що втрачатимуть несучу здатність необхідно видаляти. При цьому загальна маса тіла не зменшуватиметься на відміну від алгоритму «смерті» елементів у методі скінченних елементів. Запропонована кластерна структура, як і структура професора О. Р. Ржаніцина залишається плоскою і не придатна для моделювання об’ємних тіл.

Постановка завдання.

Метою роботи є розробка просторової моделі пружного крихкого середовища з можливістю описання процесів за межами несучої здатності тіл та обґрунтування її параметрів.

Основна частина.

Просторову модель стержневої структури побудуємо по аналогії з плоскою, у вигляді просторової ферми з хрестовою решіткою Стефана Лонга. Для використання її в розрахунках необхідно розуміти зв’язок між жорсткістю стержнів та пружними характеристиками тіла, що моделюється. Розглянемо одну комірку структури кубічної форми та виріжемо вузол *A* (рис. 3).

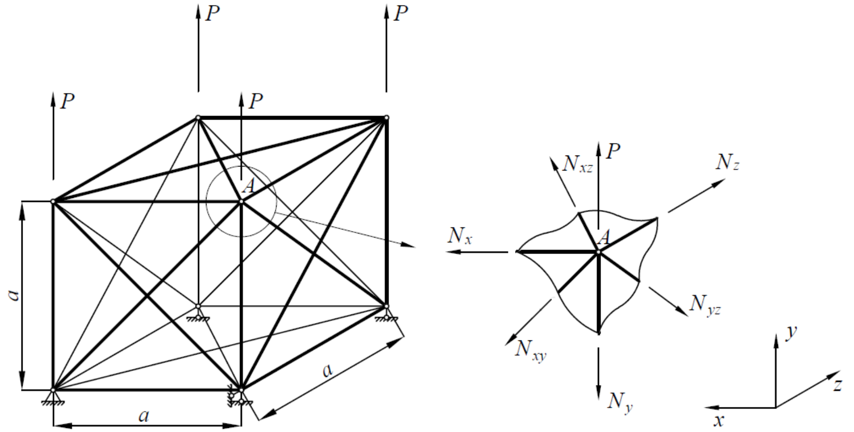

Рис. 3. Комірка структурної апроксимації просторового тіла

Запишемо рівняння рівноваги для вирізаного вузла

$$\begin{cases} N_x + N_{xy}\frac{1}{\sqrt{2}} + N_{xz}\frac{1}{\sqrt{2}} = 0; \\ -N_y - N_{xy}\frac{1}{\sqrt{2}} - N_{yz}\frac{1}{\sqrt{2}} = P; \\ N_z + N_{xz}\frac{1}{\sqrt{2}} + N_{yz}\frac{1}{\sqrt{2}} = 0, \end{cases} \tag{4}$$

де N_y, N_x, N_z – внутрішні зусилля в вертикальному та горизонтальних стержнях;

N_{xy}, N_{xz}, N_{yz} – внутрішні зусилля в розкосах;

P – зовнішнє навантаження на вузол.

З іншого боку, для пружних стержнів внутрішні зусилля можна визначити через закон Гука

$$N_x = u\frac{E_1F_1}{a};\ N_{xy} = \left(u\frac{1}{\sqrt{2}} + v\frac{1}{\sqrt{2}}\right)\frac{\eta E_1F_1}{a\sqrt{2}};$$
$$N_y = v\frac{E_1F_1}{a};\ N_{xz} = \left(u\frac{1}{\sqrt{2}} + w\frac{1}{\sqrt{2}}\right)\frac{\eta E_1F_1}{a\sqrt{2}};$$
$$N_z = w\frac{E_1F_1}{a};\ N_{yz} = \left(v\frac{1}{\sqrt{2}} + w\frac{1}{\sqrt{2}}\right)\frac{\eta E_1F_1}{a\sqrt{2}}, \tag{5}$$

де u, v, w – деформація комірки вздовж осі x, y, z.

Підставивши рівняння (5) у систему рівнянь рівноваги (4) отримаємо його матричний вигляд з врахуванням жорсткості стержнів

$$\frac{E_1F_1}{a}\begin{vmatrix} 1+\frac{\eta}{\sqrt{2}} & \frac{\eta}{\sqrt{8}} & \frac{\eta}{\sqrt{8}} \\ \frac{\eta}{\sqrt{8}} & 1+\frac{\eta}{\sqrt{2}} & \frac{\eta}{\sqrt{8}} \\ \frac{\eta}{\sqrt{8}} & \frac{\eta}{\sqrt{8}} & 1+\frac{\eta}{\sqrt{2}} \end{vmatrix}\begin{vmatrix} u \\ v \\ w \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} 0 \\ P \\ 0 \end{vmatrix}. \tag{6}$$

Для спрощення виразу (6) примемо

$$l = 1 + \frac{\eta}{\sqrt{2}}; m = \frac{4}{\sqrt{8}};\ \bar{P} = \frac{Pa}{E_1 F_1}. \tag{7}$$

Тоді вираз (6) набуває наступного вигляду

$$\begin{vmatrix} l & m & m \\ m & l & m \\ m & m & l \end{vmatrix} \begin{vmatrix} u \\ v \\ w \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} 0 \\ \bar{P} \\ 0 \end{vmatrix}. \tag{8}$$

Розв'язуючи рівняння (8) знайдемо деформації

$$u = w = -v\frac{lm - m^2}{l^2 - m^2};$$
$$v = \bar{P}\frac{l^2 - m^2}{-3lm^2 + 2m^3 + l^3}. \tag{9}$$

Зробивши обратне перетворення рівняння (9) з врахуванням (7), отримаємо залежність вертикальної деформацій комірки від жорсткості стержнів при її поздовжньому навантаженні

$$v = \frac{Pa}{E_1 F_1}\frac{8\sqrt{2} + 16\eta + 3\sqrt{2}\eta^2}{8\sqrt{2} + 24\eta + 9\sqrt{2}\eta^2 + 2\eta^3}. \tag{10}$$

Розглянута комірка структурного середовища – це модель суцільного тіла, яке має форму куба з розміром сторін *a* (рис. 4). Тому деформація структури та деформація тіла від однакового навантаження повинні збігатися.

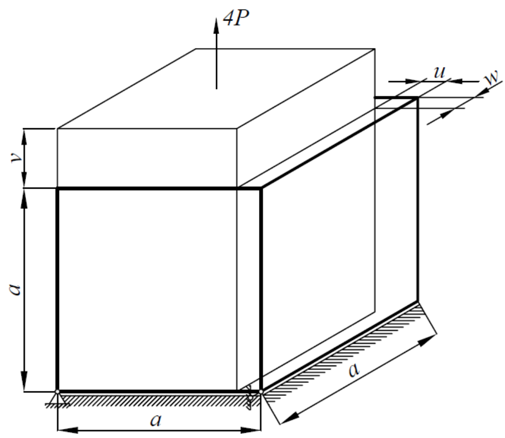

Рис. 4. Деформації тіла, що моделюється

З закону Гука деформація пружного тіла вздовж напряму дії сили дорівнює

$$v = \frac{4Pa}{Ea^2} = \frac{4P}{Ea}, \tag{11}$$

де E – модуль пружності матеріалу тіла, що моделюється.

Дорівняємо вертикальну деформацію реального тіла та стержневої моделі

$$\frac{4P}{Ea} = \frac{Pa}{E_1 F_1}\frac{8\sqrt{2} + 16\eta + 3\sqrt{2}\eta^2}{8\sqrt{2} + 24\eta + 9\sqrt{2}\eta^2 + 2\eta^3} \tag{12}$$

Для зручності приймемо, модуль пружності матеріалу стержнів моделі таким самим, як у реального тіла $E_1 = E_2 = E$, а жорсткість стержнів будемо регулювати їх площею поперечного перерізу F_1 та F_2. З рівняння (12) знайдемо площу вертикальних та горизонтальних стержнів

$$F_1 = \frac{2\sqrt{2} + 4\eta + 0{,}75\sqrt{2}\eta^2}{8\sqrt{2} + 24\eta + 9\sqrt{2}\eta^2 + 2\eta^3} a^2;\ F_2 = \eta F_1. \tag{13}$$

З залежності (13) випливає, що жорсткість стержнів залежить перш за все від модуля пружності матеріалу реального тіла та розміру комірки.

Визначимо коефіцієнт Пуассона, що забезпечується стержневою структурою

$$\mu = \frac{u/a}{v/a} = \frac{u}{v}. \tag{14}$$

Підставивши знайдене раніше переміщення (9), враховуючи перетворення (7) остаточно отримаємо коефіцієнт Пуассона

$$\mu = \frac{4\eta + \sqrt{2}\eta^2}{8\sqrt{2} + 16\eta + 3\sqrt{2}\eta^2}. \tag{15}$$

Таким чином, саме різна жорсткість у стержнів структури дозволяє враховувати та регулювати коефіцієнт Пуассона. У випадку, коли $\eta = 1$, отримуємо матеріал з фіксованим значенням $\mu = 0{,}172$. При визначенні пружних характеристик необхідно спочатку підібрати відношення жорсткості стержнів для забезпечення необхідного коефіцієнта Пуассона, а потім, враховуючи необхідні розміри комірки визначити площу перерізу стержнів F_1 та F_2. Модулі пружності E_1 та E_2 стержнів слід дорівняти до модулю пружності реального тіла E.

Ми розглянули формування структури з однією коміркою, але для моделювання тіл різноманітної форми зі складним навантаженням потрібно використовувати масив таких структур. Для цього, як і у плоских моделей потрібно застосовувати кластерний підхід, тобто приєднувати окремі комірки одну до одної. При цьому жорсткості суміжних стержнів додаються. Так жорсткості горизонтальних та вертикальних стержнів, що знаходяться всередині тіла збільшуватимуться вчетверо, а тих що знаходяться на гранях збільшуватимуться в два рази. Жорсткості стержнів, що формують ребра та жорсткості діагональних стержнів не змінюватимуться.

Необхідно зазначити, що використання кластерів дозволяє ефективно розраховувати руйнування тіл виготовлених з крихких матеріалів шляхом здійснення покрокового розрахунку з виключенням на кожному кроці процесу зруйнованих кластерів. Під руйнуванням кластеру слід розуміти втрату їм внутрішньої геометричної незмінності. При цьому робота стержневої конструкції відповідає виключно за реологію тіла. Маси розподіляються по вузлах структури та відповідають за динамічні властивості. Вони не видаляються при знищені елементів, що втратили несучу здатність. Взаємодія окремих тіл, або часток зруйнованих тіл відбувається за допомогою обмежуючих сфер.

Висновки.

Просторова стержньова структура з використанням кластерів дозволяє ефективно моделювати процеси пов’язані з руйнуванням тіл, виготовлених з крихких матеріалів. Жорсткість стержнів, якими апроксимується тіло залежить від модуля пружності його матеріалу, розміру комірок та може бути визначено за допомогою знайденої залежності. Різниця у жорсткості різних стержнів дозволяє емітувати потрібний коефіцієнт Пуассону.

Список літератури:

1. Ромашко В.М. Деформаційно-силова модель опору бетону та залізобетону: Монографія. Рівне: НУВГП, 2016. 424с.

2. Дорофєєв О.А. Моделі ґрунтового середовища для розрахунків основ фундаментів архітектурних споруд та моделювання процесу земляних робіт при їх спорудженні. *Вісник Хмельницького національного університету. Технічні науки*. № 3. Хмельницький: ХНУ, 2018. С. 91-95.

3. ANSYS Mechanical APDL Advanced Analysis Guide. Canonsburg, PA: ANSYS, Inc., 2013. 396 p.

4. Конгер Д. Физика для разработчиков компьютерных игр. Пер. с англ. А.С. Молявко. М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2007. 520 с.

5. David M. Bourg, Bryan Bywalec. Physics for Game Developers, Second Edition. Sebastopol: O'Reilly Media, Inc., 2013. 553 p.

6. Овчаренко А.А., Овчаренко А.С. Новый подход к моделированию процессов механической обработки почвы. *Збірник наукових праць Луганського національного аграрного університету. Серія: Технічні науки*. Луганськ: ЛНАУ, 2011. С. 155-165.

7. Ржаницын А.Р. Представление сплошного изотропного упругого тела в виде шарнирно-стержневой системы. *Исследования по вопросам строительной механики и теории пластичности* / Под. ред. А. Р. Ржаницына. М.: Стройиздат, 1956. С. 84-96.

8. Ржаницын А.Р. Строительная механика: Учеб. пособие для вузов. М.: Высш. школа, 1982. 400 с.

9. Овчаренко О. А. Моделювання суцільного середовища системою стрижнів. *Динаміка, міцність та моделювання в машинобудуванні: тези доп. II Міжнар. наук.-практ. конф.*, (05-08 жовт. 2020 р., м. Харків) / Ін-т проблем машинобуд. ім. А.М. Підгорного НАН України. Харків, 2020. С. 255-258

References:

1. Romashko, V.M. (2016). *Strain-force model of resistance to concrete and reinforced concrete:* Monograph. Rivne: NUVHP.

2. Dorofieiev, O.A. (2018). Soil models for calculations of foundations of architectural structures and modeling of excavation during their construction. *Herald of Khmelnytskyi National University. Technical sciences*, (3). Khmelnytskyi: KhNU, pp. 91-95.

3. ANSYS Mechanical APDL Advanced Analysis Guide. (2013). Canonsburg, PA: ANSYS, Inc.

4. Conger, D. (2007). Physics Modeling for Game Programmers. Moscow, Russia: BINOM. Laboratorija znanij.

5. David M. Bourg. (2013). *Physics for Game Developers*, Second Edition. Sebastopol: O'Reilly Media, Inc.

6. Ovcharenko, A.A. (2011). A new approach to the modeling of tillage processes. *Proceedings of Luhansk National Agrarian University. Series: technical sciences*. Luhansk: LNAU, pp. 155-165.

7. Rzhanicyn, A.R. (1956). Representation of a continuous isotropic elastic body in the form of an articulated rod system. *Studies in Structural Mechanics and Plasticity Theory*. Moscow, Russia: Strojizdat, pp. 84-96.

8. Rzhanicyn, A.R. (1982). *Structural Mechanics*: Textbook for higher education institutions. Moscow, Russia: Vyssh. shkola.

9. Ovcharenko O.A. (2020). Simulation of a solid medium by a rod system. *Dynamics, Strength and Modelling in Mechanical Engineering. Theses of the Second International Science and Technology Conference 05–08 October, 2020.* Kharkiv: A. Pidhornyi Institute of Mechanical Engineering Problems of the National Academy of Sciences of Ukraine.

В.И. Доненко, А.А. Овчаренко

Разработка пространственной модели хрупкой среды для описания процессов за границами несущей способности тел

Существующие модели тел основываются на условии сплошности материала, из которого они изготовлены. При этом существуют задачи, противоречащие этому условию. Например, моделирование обрушения строения, моделирование процесса работы землеройных машин. Такие задачи требуют использования дискретных моделей, не опирающихся на сплошность. Интересной моделью является модель упругих тел в компьютерных играх, состоящая из упругих соединений, соединяющихся в узлах. Таким образом, образуется своеобразная пространственная ферма. Если сосредоточить массы в узлах, введя дополнительно ограничивающие сферы для контактного расчета, появляется возможность моделирования процесса разрушения конструкции из-за уничтожения связей в пошаговом расчете. Недостатком этой модели является отсутствие теоретического обоснования с сосредоточением на визуальной и ресурсной эффективности.

Подобную стержневую аппроксимацию упругих тел еще в 1956 году предложил профессор А.Р. Ржаницын. В своих работах он рассматривал плоскую пластину, учитывая значение упругих характеристик тела из-за характеристик стержней структуры. Его идеи не нашли широкого развития в связи с отсутствием технических возможностей подобного расчета. Кроме того, метод конечных элементов оказался более эффективным. В настоящее время появились технические возможности, а метод конечных элементов, эффективно работая на сплошных телах, имеет ограниченные возможности в задачах разрушения тел.

Повысить качество полученных результатов при стержневой аппроксимации можно, перейдя к кластерной модели, в которой вся структура рассматривается как совокупность кластеров. Для обычных форм и нагрузок таковой подход позволяет понизить погрешность до нуля. Однако эти исследования выполнены только для плоской задачи.

Пространственные тела также можно аппроксимировать с помощью стержневых кластеров. Для обоснования такого подхода рассматривается работа одного кластера: равновесие узла и стержней, присоединяемых к этому узлу. Это позволяет определить зависимость деформаций кластера от жесткости его стержней. Приравняв деформации кластера и объемного тела, которое описывает этот кластер, установлено необходимое значение жесткости стержней, обеспечивающих упругие характеристики реального тела.

Ключевые слова: моделирование, хрупкая среда, дискретная модель, стержневая аппроксимация, модель масс и связей.

V. Donenko, O. Ovcharenko

Development of a spatial model of a brittle medium for description of processes beyond the limits of a body carrying capacity

Existing body models are based on the condition of solidity of the material of which they are made. However, there are tasks contradicting this condition. For example, simulation of a building collapse, simulation of the process of excavation machines. Such problems require the use of discrete models that do not rely on continuity. An interesting model is the model of elastic bodies in computer games, consisting of elastic joints connected in nodes. In this way, a kind of spatial truss is formed. If we concentrate the masses in the nodes, introducing additional bounding spheres for contact calculation, it becomes possible to simulate the process of structure failure due to destruction of connections in the step-by-step calculation. The disadvantage of this model is the lack of theoretical justification with a focus on visual and resource efficiency.

A similar rod approximation of elastic bodies was proposed back in 1956 by Professor A.R. Rzhanitsyn. In his works, he considered a flat plate, taking into account the importance of the elastic characteristics of the body due to the characteristics of the rods of the structure. His ideas did not find wide development due to the lack of technical capabilities of such calculation. In addition, the finite element method proved to be more effective. Nowadays, technical possibilities are available, while the finite element method, while working effectively on solid bodies, has limited possibilities in the problems of body fracture.

It is possible to improve the quality of the results obtained with the rod approximation by changing to the cluster model in which the whole structure is considered as a set of clusters. For conventional shapes and loads, such an approach makes it possible to reduce the error to zero. However, these studies have been performed only for the planar problem.

Spatial bodies can also be approximated by means of rod clusters. To justify this approach, the operation of a single cluster is considered: the equilibrium of a node and the rods attached to this node. This allows us to determine the dependence of the deformations of the cluster on the stiffness of its rods. By equating the deformations of the cluster and the bulk body, which describes this cluster, the necessary value of rod stiffness, which provides elastic characteristics of a real body, is established.

Key words: modeling, brittle medium, discrete model, rod approximation, mass and spring model.

Посилання на статтю

APA: Donenko, V., & Ovcharenko, O. (2022). Development of a spatial model of a brittle medium for description of processes beyond the limits of a body carrying capacity. *Shliakhy pidvyshchennia efektyvnosti budivnytstva v umovakh formuvannia rynkovykh vidnosyn*, 49 (1), 49-58.

ДСТУ: Доненко В.І., Овчаренко О.А. Розробка просторової моделі крихкого середовища для описання процесів за межами несучої здатності тіл. *Шляхи підвищення ефективності будівництва в умовах формування ринкових відносин*. 2022. № 49 (1). С. 49-58.