РОЗРОБКА ВЕБ-ДОДАТКУ ДЛЯ МОДЕЛЮВАННЯ СИПКИХ МАТЕРІАЛІВ МЕТОДОМ ДИСКРЕТНИХ ЕЛЕМЕНТІВ

Кучерявенко А. О.

Сипучі речовини залучені в різні промислові процеси. Сучасні компанії потребують точного аналізу та прогнозування поведінки і стану даних матеріалів. Моделювання поведінки сипучих середовищ гарантує якість, точність проектування, допомагає аналізувати, прогнозувати і запобігати отриманню небажаних результатів у промислових процесах. В доповіді подано основні аспекти розробки мобільного середовища моделювання на основі методу дискретних елементів.

Ключові слова: МДЕ, сипучі речовини, моделювання, мобільність, симуляція.

Загальний опис. Для моделювання механічної поведінки твердих частинок сипких матеріалів широко застосовується метод дискретних елементів (МДЕ). МДЕ є найбільш потужним інструментом для розрахунку динаміки великої кількості частинок розміру мікрон і більше [1, 2]. Цей метод заснований на тому, що кожна тверда частка розглядається як окремий об'єкт, рух якого та взаємодії з іншими об'єктами описуються рівняннями Ньютона (рів. 2, 3). Дискретний підхід точно моделює мікромеханіку гранульованого матеріалу. На рис. 1 наведено загальний принцип розрахунку поведінки частинок за допомогою МДЕ.

Найбільш трудомісткою частиною МДЕ є виявлення контактів між великою кількістю моделей. Умова контакту частинок має наступний вигляд:

$$\delta_{ij} = R_i + R_j - |O_i - O_j| > 0 \quad (1)$$

де R_i і R_j - радіуси часток, δ_{ij} - перетин часток, O_i та O_j - центри часток.

Система рівнянь Ньютона, які вирішуються для всіх частинок, має вигляд [1]:

$$m_p \frac{dv}{dt} = \sum_{i=1}^n F_i \quad (2)$$

$$I_p \frac{dw}{dt} = \sum_{i=1}^n M_i \quad (3)$$

Тут t - час здійснення процесу на певному етапі; m_p - маса p -ї частинки; I_p - момент інерції p -ї частинки; F_i - сума сил, що діють на частинки (включаючи силу тертя об

похилу кругову поверхню); I_p - момент сил, M_i - обертаючий момент, v - швидкість частинки, w - кутова швидкість.

Рис. 1. Загальний алгоритм розрахунку поведінки частинок.

За допомогою розкладання в ряд Тейлора на кожному часовому кроці виконується оновлення позиції, швидкості та обертання частинок:

$$\begin{aligned} g(t + \Delta t) &= g(t) + \Delta t \cdot \frac{dg(t)}{dt} \\ x(t + \Delta t) &= x(t) + \Delta t \cdot v(t) \\ \omega(t + \Delta t) &= \omega(t) + \Delta t \cdot \frac{d\omega(t)}{dt} \end{aligned} \quad (4)$$

Рис. 2. Оновлення даних частинок на кожному часовому кроці.

Розробка. Основною метою цього проекту є розробка нової відкритої веб-орієнтованої системи для портативного моделювання сипких матеріалів методом

дискретних елементів на основі консольної симуляційної програми Musen (стаціонарне програмне забезпечення, розроблено у інституті інженерії твердих процесів і технологій дрібних частинок у м. Гамбург [3]). Веб-додаток має спростити проведення процесу моделювання за рахунок мобільності, що надає можливість проводити потужні розрахунки з будь-якого пристрою (планшет, ноутбук, телефон). Використовуючи Musen на віддалених серверах, користувач не повинен мати потужні локальні обчислювальні ресурси, це сприяє удосконаленню розуміння процесів та використанню в навчальних цілях.

На рисунку 3 наведено загальний алгоритм роботи веб-додатку.

Рис. 3. Загальний алгоритм роботи веб-додатку

Розроблена програма має клієнт-серверну архітектуру. Серверну частину розроблено на базі NodeJS. Для обміну повідомленнями між браузером і веб-сервером в режимі реального часу застосовано протокол WebSocket. Клієнт-сервер співпрацює через Socket.IO та бібліотеку веб-додатків JavaScript. Це дозволяє здійснювати двостороннє спілкування між веб-клієнтами та серверами в реальному часі. У якості бази даних обрано MongoDB. Для відображення анімованої 3D-комп'ютерної графіки на клієнті обрано бібліотеку Three.js.

При відкритті головної сторінки відбувається встановлення зв'язку через websocket з сервером, та користувач отримує унікальний ідентифікатор (user_id).

Для початку моделювання потрібно обрати сцену моделювання в тривимірному просторі і задати наступні параметри моделювання: крок моделювання (simulation_step), крок зберігання результату (saving_step) та тривалість моделювання (end_time) (рис.4). За допомогою клавіатури можна виконувати переміщення камери вліво, вправо, вперед і назад, використовуючи відповідні клавіші A, D, W, S. Утримуючи праву та ліву кнопку миші, можливо обертати та переміщувати сцену моделювання.

Рис. 4. Структура головної сторінки та ініціалізація параметрів моделювання.

Після запуску моделювання задані параметри у вигляді вхідного ключа (json input_data) передаються на серверну частину, де запускається Musen з отриманими параметрами. Після відпрацювання програми розраховані значення записуються в базу даних. Веб-сервер отримує код завершення Musen, зчитує з бази даних результати першої часової точки, та передає через websocket до клієнта. За допомогою three.js результати відображаються у браузері на результуючій сторінці.

Використовуючи слайдер (рис.5), користувач має можливість переглянути результат на кожному кроці моделювання. При змінні часової точки відбувається запит до сервера з метою зчитати нові параметри всіх частинок (координати, швидкості). На рисунку 5, 6 можна побачити моделювання в різні часові точки.

Також у програмі реалізована можливість розфарбовування частинок відповідно до таких параметрів, як маса, швидкість та координати (рис.6). Це потрібно для розуміння стану поточної системи, наприклад, які частинки ще рухаються, а які зупинились.

Рис. 5. Початковий стан.

Рис. 6. Стан процесу на кроці 0,01 сек. та розфарбування частинок.

Висновки. Моделювання сипких матеріалів дає можливість передбачити їх поведінку, аналізувати вплив різних параметрів та факторів на технологічні процеси і розробляти стратегії контролю. Описану програму розроблено на базі сучасних веб-технологій, вона має зручний і інтуїтивно зрозумілий інтерфейс користувача. Слід відзначити, що при наявності великої кількості частинок процес

моделювання може тривати від декількох днів до декількох тижнів. На даний час розробляється концепція прискорення обчислень за рахунок паралельних технологій [4, 5]. Саме метод дискретних елементів дозволяє нам розглянути кожну частинку як окремий об'єкт, призначити їй MIMD-процес і виконати паралельне моделювання.

Література

- [1] P.A. Cundall, O.D.L. Strack. A discrete numerical model for granular assemblies. *Geotechnique* 29, 1979, С. 47-65.
- [2] Хорошевський В.Г. Обчислювальні методи, алгоритми та апаратно-програмний інструментарій паралельного моделювання природних процесів // Інтеграційні проекти, 2012, С. 202-210.
- [3] Institute of Solids Process Engineering and Particle Technology. [ONLINE] Режим доступу: <https://www.tuhh.de/spe/institute.html> [Перевірено: 30.10.2019].
- [4] Feldmann, L., Resch, M., Svjatnyj, V., Zeitz, M.: Softwarearchitektur für parallele Simulationsumgebungen (Forschungsgebiet: parallele Simulationstechnik). Plenarvortrag, ASIM'2014 in Berlin, Tagungsband 1, ARGESIM Report 43, Wien 2014, С. 3-7.
- [5] Svjatnyj V., Gilles E.-D., Zeitz M., Reuter A., Rothermel K. Simulationssoftware für eine parallele Simulationsumgebung für dynamische Systeme. 14. Symposium ASIM'2000. – Tagungsband, SCS, 2000. – С. 235–240.

References

- [1] P.A. Cundall, O.D.L. Strack. A discrete numerical model for granular assemblies. *Geotechnique* 29, 1979, pp. 47-65.
- [2] Khoroshevskiy V.H. Computational methods, algorithms and hardware and software tools for parallel modeling of natural processes // *Integration projects*, 2012, pp. 202-210.
- [3] Institute of Solids Process Engineering and Particle Technology. [ONLINE] Available at: <https://www.tuhh.de/spe/institute.html> [Accessed 30 October 2019].
- [4] Feldmann, L., Resch, M., Svjatnyj, V., Zeitz, M.: Softwarearchitektur für parallele Simulationsumgebungen (Forschungsgebiet: parallele Simulationstechnik). Plenarvortrag, ASIM'2014 in Berlin, Tagungsband 1, ARGESIM Report 43, Wien 2014, pp. 3-7.
- [5] Svjatnyj V., Gilles E.-D., Zeitz M., Reuter A., Rothermel K. Simulationssoftware für eine parallele Simulationsumgebung für dynamische Systeme. 14. Symposium ASIM'2000. – Tagungsband, SCS, 2000. – pp. 235–240.

Надійшла до редакції 25.04.2019 р.

Кучерявенко Аліна Олександрівна – аспірант, Донецький національний технічний університет (пл. Шибанкова, 2, м. Покровськ, 85300, Україна).
E-mail: akucheriavenko@gmail.com.

WEB APPLICATION DEVELOPMENT FOR MODELING BULK MATERIALS BY DISCRETE ELEMENTS METHOD

If the language of the article is different from Ukrainian, an annotation (not less than 1800 characters) and a list of keywords are given in Ukrainian. If the language of the article is different from English, an annotation (not less than 1800 characters) and a list of keywords in English are given. The abstract should contain information about the purpose, methods and results of the research, scientific novelty and / or practical significance of the results. The main text of the article should be structured and consist of the following sections: introduction, analysis of recent research and publications on the topic, purpose of the research, materials and methods, results and their discussion, conclusions. The total volume of the article is 6-10 pages.

Keywords: MDE, bulk materials, modeling, mobility, simulation.

Kucheriavenko Alina Oleksandrivna – PhD-student, Donetsk National Technical University, (2, Shybankova square, Pokrovsk, Donetsk region, 85300, Ukraine).
E-mail: akucheriavenko@gmail.com.