

## Принципи побудови чисельних моделей для імітацій швидкоплинних процесів викликаних імпульсними навантаженнями

Дмитро Нечипоренко, аспірант<sup>1</sup> (ORCID: 0009-0006-6697-2381),  
Віктор Носенко, к.т.н, доц., зав. каф.<sup>2,1</sup> (ORCID: 0000-0002-8261-1846)

<sup>1</sup> Київський національний університет будівництва і архітектури, 03037, м. Київ, проспект Повітряних Сил, 31, Україна

### АНОТАЦІЯ

Продемонстровано та описано різні підходи моделювання сітки скінченних елементів в програмному комплексі LS-Dyna (Livermore Software Dynamic). Були розглянуті чотири основні методи: Лагранжа, Ейлера, ALE (Arbitraty-Lagrangian-Eulerian), SPH (Smoot Particle Hydrodynamics).

Ключові слова: сітка Лагранжа, сітка Ейлера, ALE, SPH, моделювання

### 1. ВСТУП

Перед сучасним інженером кожного дня постає багато задач різної складності. Такими є задачі пов'язані з аналізом НДС (напружено-деформованого стану) будівель, споруд, ґрунтового середовища, а також окремих елементів конструкцій під впливом імпульсних або динамічних навантажень у часі. Одним із прикладів такого навантаження може бути вибух, адже це миттєвий процес який відбувається за дуже короткий проміжок часу та викликає значні деформації конструкцій під час впливу на них. Удар снаряду по поверхні конструкції також можна назвати імпульсним навантаженням. Під час проведення розрахунків пов'язаних з міцністю та надійністю захисних конструкцій дані навантаження можуть поєднуватися між собою, спочатку іде проникна дія боєголовки, а потім відбувається вибух.

Потужним інструментом для вирішення таких проблем є програмний комплекс LS-Dyna. Даний програмний комплекс використовується для моделювання швидкоплинних процесів зі значними пластичними деформаціями.

### 2. ПІДХОДИ ПРИ МОДЕЛЮВАННІ

Різні задачі вимагають тих чи інших підходів при створенні моделі (побудови сітки скінченних елементів) об'єкта, що досліджується. Можна виділити чотири основні з них:

1. Лагранжа
2. Ейлера
3. ALE (Arbitraty-Lagrangian-Eulerian)
4. SPH (Smoot Particle Hydrodynamics)

#### 2.1. Метод Лагранжа

При використанні методу Лагранжа вузли сітки скінченних елементів пов'язані з вузлами матеріалу моделі (Рис. 1) [1]. Такий підхід дозволяє легко відстежувати вільні поверхні та чітко бачити межу між різним матеріалами елементів конструкцій. Зазвичай Лагранжову сітку використовують при вирішенні задач будівельної механіки. Головним недоліком цього підходу є не здатність описати великі деформації, під час розрахунку можуть виникнути помилки або результати будуть не зовсім точні [2].

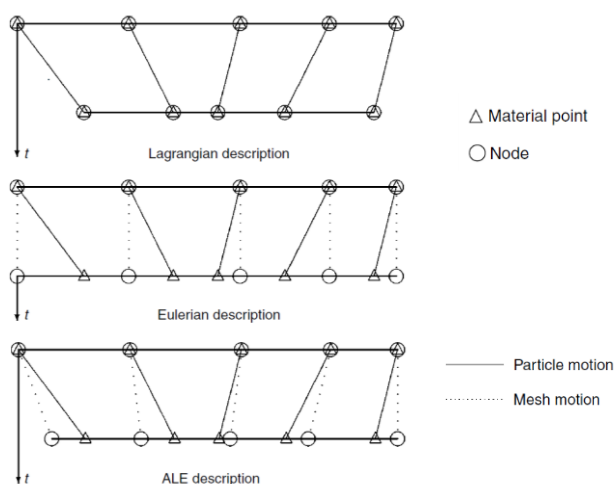


Рисунок 1. Моделювання сітки скінченних елементів за допомогою метода Лагранжа, Ейлера та ALE

#### 2.2. Метод Ейлера

Сітка Ейлера на відміну від Лагранжевої може легко впоратися зі значними спотвореннями моделі, тому широкого використання вона набула при розв'язанні задач пов'язаних з гідродинамічними розрахунками [2].

При використанні методу Ейлера створюються дві сітки, які накладаються одна на одну. Перша сітка є фоновою і закріплена у просторі, являє собою певну область. Інша сітка представляє собою матеріал, який може вільно рухатися в межах фонової сітки (Рис. 1).

Метод Ейлера також має недоліки. Наприклад, проблеми дисипації та розсіювання енергії пов'язані з потоком мас між елементами. Також в результаті того, що фонова сітка є закріплена в просторі, а предмет нашого аналізу знаходить всередині цієї сітки її розміри повинні бути достатніми, щоб граничні умови не впливали на результати розрахунку та була можливість охопити весь простір в якому розміщений матеріал під час симуляції. Це може призвести до значної кількості скінченних елементів в моделі, що в свою чергу значно збільшить час розрахунку [3].

#### 2.3. ALE (Arbitraty-Lagrangian-Eulerian)

Даний метод комбінує два попередніх та поєднує в собі їхні переваги.

В цьому підході також створюються дві сітки, що накладаються одна на одну, але на відміну від чистого Ейлерового підходу фонова сітка може довільно рухатися в просторі. Це дозволяє зменшити її розмір, оскільки матеріал рухається разом з нею, а завдяки контрольованому переміщенню оберганню та деформації фонової сітки зменшується перетікання мас між елементами, що не викликає проблем з втратами енергії. Головною відмінністю між Ейлеровою сіткою та ALE є різниця між кількістю матеріалу, що проходить через опорні частини сітки [3]. Враховуючи те що рух сітки в просторі є контрольованим, користувач може аналогічно до Ейлерового підходу закріпити фонову сітку в просторі.

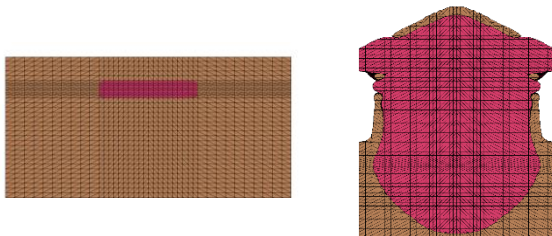


Рисунок 2. Використання сітки Ейлера для моделювання підземного вибуху

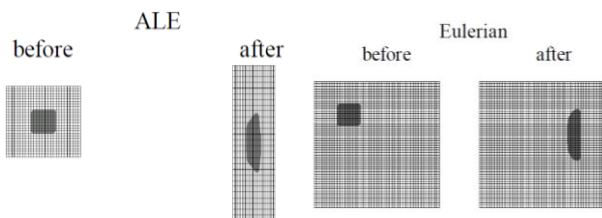


Рисунок 3. Різниця між підходом ALE та Ейлера на початку симуляції та після

#### 2.4. SPH (Smooth Particle Hydrodynamics)

SPH є безсітковим методом Лагранжа, який розроблявся для симуляції проблем, що виникають в астрофізиці. Проте через зручність та здатність відтворювати складні фізичні явища, даний підхід став гарним інструментом при вирішенні широкого поля задач пов'язаних з механікою суцільних середовищ, моделюванням різних аварійних ситуацій та пластичним і крихким руйнуванням твердих тіл.

SPH через відсутність сітки в класичному її розумінні дозволяє розв'язувати задачі пов'язані з великою нерегулярною геометрією.

Також широкого використання даний метод набув в гідродинаміці. За допомогою SPH можна представити рідину, як набір окремих частинок, що рухаються зі швидкістю потоку. Кожна частинка представлена точкою, що інтерполюється, яка має всі параметри рідини які нам відомі.

При створенні SPH сітки необхідно контролювати відстань між її частинками. Це означає, що сусідні частинки, які мають однакову щільність, а отже і однаковий матеріал належать до одного початково об'єму. Для досягнення цього треба робити сітку однорідною [4].

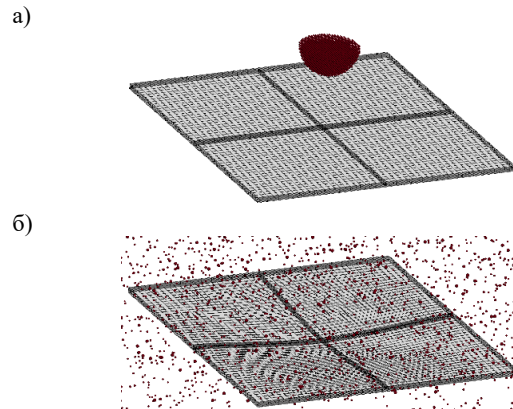


Рисунок 4. Моделювання дії вибуху на конструкцію за допомогою SPH методу: а) до початку розрахунку; б) після розрахунку

### 3. ВИСНОВКИ

Продемонстровано основні методи побудови сітки скінчених елементів при моделюванні швидкоплинних процесів, що супроводжуються великими деформаціями.

Для моделювання явищ пов'язаних з вибухом, а також ударних навантажень під час яких два об'єкти зіштовхуються між собою на великих швидкостях найкраще всього застосовувати підхід ALE, оскільки він включає в себе переваги чистої Ейлерової та Лагранжової сіток. Також, можна комбінувати метод SPH та Лагранжа. Наприклад, якщо припускається, що в певній зоні будуть виникати значні спотворення в цьому місці доцільно створити геометрію об'єкта за допомогою SPH та використовувати спеціальні контакти поєднати дані сітку з Лагранжевою.

Таким чином залежно від завдання та мети яка ставиться перед інженером вибір одного з методів або їх комбінація призводить до балансу між якістю розрахунку та його швидкістю.

#### Список літератури

- [1] Lars Olovsson, Mhamed Souli, Ian Do, LS-DYNA–ALE Capabilities (Arbitrary-Lagrangian-Eulerian) Fluid-Structure Interaction Modeling, January 07, 2003. URL: <https://ftp.lstc.com/anonymous/outgoing/jday/aletutorial-278p.pdf>
- [2] Donea, J., Huerta, A., Ponthot, J.-Ph. and Rodríguez-Ferran, A., Arbitrary Lagrangian-Eulerian methods, *The Encyclopedia of Computational Mechanics*, Wiley, Vol. 1, Chapter 14, pp. 413-437, 2004
- [3] Lars Olovsson, M'hamed Souli, ALE and Fluid-Structure Interaction Capabilities in LS-Dyna. URL: <https://lsdyna.ansys.com/wp-content/uploads/attachments/session15-4.pdf>
- [4] Jean Luc LACOME, Smooth Particle Hydrodynamics (SPH): A New Features in LS-Dyna. URL: <https://lsdyna.ansys.com/wp-content/uploads/attachments/session7-3.pdf>

<sup>1</sup> Робота виконана під керівництвом к.т.н, доцента Віктора Носенко