

Принципи побудови числових моделей для дослідження впливу імпульсних навантажень на заглиблені споруди

Віктор НОСЕНКО¹, Дмитро НЕЧИПОРЕНКО²

Київський національний університет будівництва і архітектури
31, просп. Повітряних Сил, Київ, Україна, 03037,

¹v.s.nosenko@gmail.com, orcid.org/ 0000-0002-8261-1846

²dimanechiporenko072@gmail.com, orcid.org/ 0009-0006-6697-2381

DOI: 10.32347/0475-1132.49.2024.55-61

Анотація. Сьогодні в Україні зумовило нові проблемні задачі геотехніки розв'язок яких направлений на захист об'єктів критичної інфраструктури від дії вибухових ударних хвиль. Для захисту об'єктів критичної інфраструктури будують захисні споруди, які заглиблюють в ґрунтового середовище. Необхідною умовою забезпечення їх надійної експлуатації є оцінка напружено-деформованого стану системи «ґрунтового середовище-захисна споруда». Важливим є вибір адекватної феноменологічної моделі поведінки матеріалів захисної споруди та ґрунтового середовища, що описують роботу матеріалів при дії імпульсних впливів. У роботі проаналізовано чотири методи побудови числових моделей для розрахунків впливу імпульсних навантажень, це методи:

1. Сітка Лагранжа.
2. Сітка Ейлера.
3. Довільний Лагранжа-Ейлера / Arbitrary Lagrangian-Eulerian (ALE).
4. Гідродинаміка плавних частинок* / Smooth Particle Hydrodynamics (SPH).

* - авторський переклад з метою адаптації назви методу українською мовою.

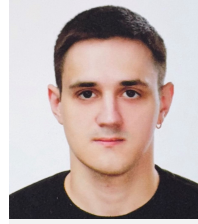
Кожен з методів має свої переваги та недоліки. Сітка Лагранжа дозволяє легко відстежувати межу між матеріалами різних конструкцій, як до початку розрахунку так і після та не вимагає багато часу на обчислення, проте вона не є практичною у випадках значних деформацій моделі із швидкими змінами у часі.

Методи Ейлера та довільний Лагранжа-Ейлера дозволяють моделювати задачі в яких відбувається велике спотворення моделі, наприклад підземний або підводний вибух, а їх недоліком є розмір розрахункової області, зна-



Віктор НОСЕНКО

завідувач кафедри
геотехніки
к.т.н., доц.



Дмитро НЕЧИПОРЕНКО

аспірант кафедри
геотехніки

чна трудомісткість при налаштуванні моделі.

Гідродинаміка плавних частинок це безсітковий метод Лагранжа. Його перевагою також є можливість працювати з великими деформаціями моделі, а недоліком трудомісткість та час.

Всі ці методи побудови числової моделі доступні в програмному комплексі LS-Dyna. Аналізуючи розрахунки, що були зроблені в LS-Dyna встановлено, що сіткою Лагранжа доцільно користуватися створюючи модель конструкції з залізобетону або сталі, оскільки їх жорсткість є високою. Для ґрунту доцільно застосувати методи Ейлера та ALE, оскільки вони дозволяють сильно змінювати свою геометрію моделі під дією вибуху. Різні методи комбінуються між собою для досягнення адекватної роботи моделі та отримання коректних результатів, які будуть максимально відповідати реальній поведінці конструкцій, споруд та матеріалів під дією імпульсних навантажень.

Ключові слова. сітка скінченних елементів, сітка Лагранжа, сітка Ейлера, ALE, SPH, імпульсні навантаження.

ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМИ

Сучасний світ кожного дня створює нові виклики для інженерів. З розвитком технологій розвиваються і вимоги до проектування, розрахунки стають складнішими та більш комплексними. До таких розрахунків відносяться задачі пов'язані з аналізом напружено-деформованого стану будівель, споруд, окремих конструкцій та їх елементів, а також ґрунтового середовища під впливом імпульсних або динамічних навантажень, що швидко змінюються в часі. Такими є вибухове навантаження, оскільки даний процес є миттєвим, відбувається за дуже короткий проміжок часу, та супроводжується великими деформаціями конструкцій під час впливу на них. Іншим прикладом імпульсного навантаження можна вважати удар по поверхні конструкції. Для оцінки надійності споруди необхідно виконати комплексний аналіз міцності споруди, де такі навантаження можуть комбінуватися між собою.

Для вирішення задач даного типу використовується числове моделювання. Програмний комплекс, що дає можливість виконувати розрахунки пов'язані з мультифізичними явищами в тому числі моделювати швидкоплинні процеси зі значними пластичними деформаціями є LS-Dyna (Livermore Software Dynamic). Цей інструмент дозволяє використовувати декілька методів побудови розрахункової моделі, яка являє собою сітку скінченних елементів. Вибір методу впливає на якість та швидкість розрахунку, тому він є дуже важливим.

АНАЛІЗ ПОПЕРЕДНІХ ДОСЛІДЖЕНЬ

У роботах [1-6] описуються основні принципи побудови сітки скінченних елементів при використанні одного з чотирьох методів: Лагранжа, Ейлера, Довільний Лагранжа-Ейлера (Arbitrary Lagrangian-Eulerian ALE) та Гідродинаміка плавних частинок (Smooth Particle Hydrodynamics SPH).

МЕТА РОБОТИ

Оцінити різні методи побудови числових моделей для моделювання швидкоплинних процесів, виділити переваги та недоліки кожного з них. Дати рекомендації щодо практичного застосування цих методів для оцінки напружено-деформованого стану системи «ґрунтове середовище-захисна споруда» при дії імпульсних впливів.

ОСНОВНІ МЕТОДИ ПОБУДОВИ СІТКИ СКІНЧЕННИХ ЕЛЕМЕНТІВ

Використовуючи числове моделювання при вирішенні задач пов'язаних з імпульсними навантаженнями треба враховувати наявність швидкоплинних великих деформацій та можливого спотворення моделі під час розрахунків. Зазвичай є декілька методів змоделювати один і той самий фізичний процес. Дуже важливо обрати саме такий, що дозволить описувати значні деформації об'єкта, що досліджується і вирішувати поставлену задачу з достатньою точністю для конкретного розрахунку. Вибір методу залежить від багатьох факторів, наприклад: розмірів конструкції, яка досліджується, матеріал з якого вона зроблена та середовища в якому протікає процес (повітря, ґрунт, вода). Є чотири основні методи побудови сітки скінченних елементів:

1. Метод Лагранжа. Вузли сітки зв'язані з уявною матеріальною точкою та рухаються разом.

2. Метод Ейлера. Розглядаються дві сітки, що накладаються одна на одну. Перша є фоноюю і фіксованою (нерухомою) у просторі, друга відповідає за матеріал, який рухає в межах першої.

3. Метод довільний Лагранжа-Ейлера (Arbitrary Lagrangian-Eulerian ALE). Розглядаються дві сітки, що накладаються одна на одну. Перша є фоноюю і може довільно рухатися в просторі, друга відповідає за матеріал, який рухає в межах першої [3].

4. Метод Гідродинаміка плавних частинок (Smooth Particle Hydrodynamics SPH). Один із варіантів метода Лагранжа в якому відсутня сітка у класичному її розумінні.

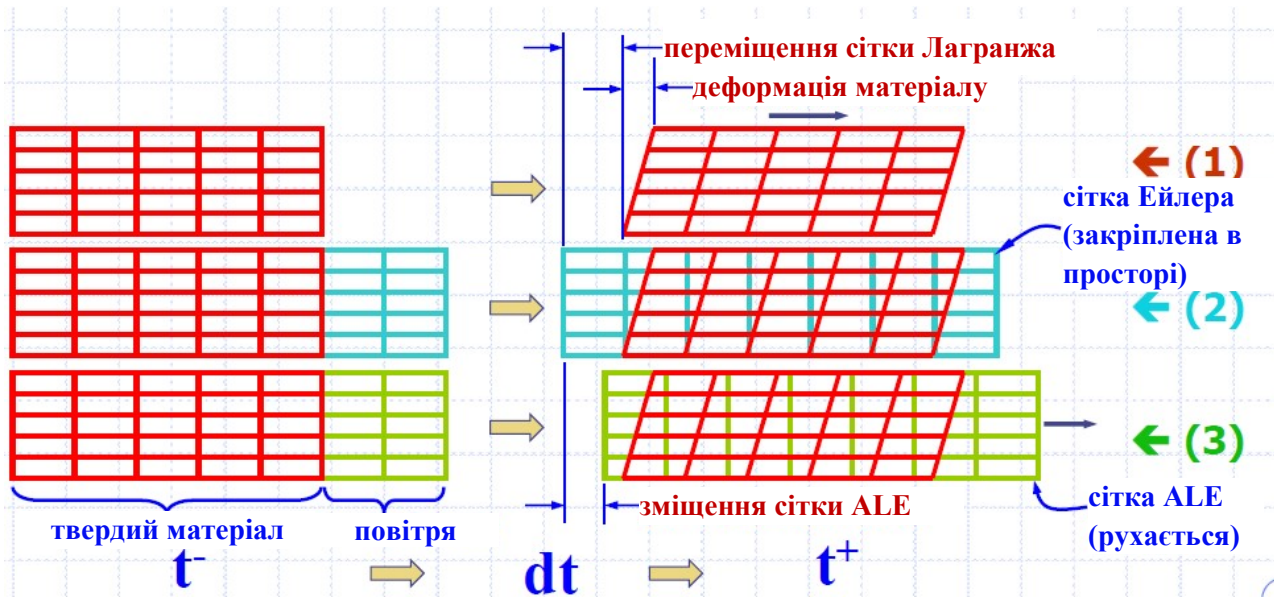


Рис.1. Представлення в 2D постановці трьох методів, які можна використати: 1) Лагранжа, 2) Ейлера та 3) довільний Лагранжа-Ейлера [3].

Fig.1. Representation in 2D of the three methods that can be used: 1) Lagrangian, 2) Eulerian, and 3) Arbitrary Lagrangian-Eulerian ALE [3].

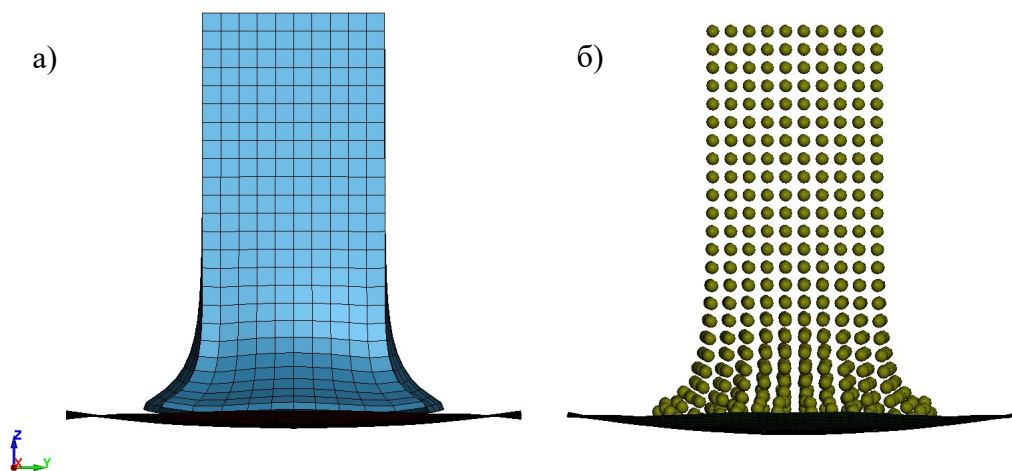


Рис.2. Порівняння деформованого тіла змодельованого сіткою Лагранжа (а) та метод SPH (б).
Fig.2. Comparison of a deformed body modeled by a Lagrangian mesh (a) and SPH method (b).

МЕТОД ЛАГРАНЖА

Головний алгоритм роботи метода Лагранжа полягає в тому, що кожен окремий вузол сітки скінченних елементів пов'язаний з відповідною матеріальною точкою та в процесі деформування тіла рухається разом з нею. Це дозволяє легко відстежувати вільні поверхні та чітко бачити межу між різними матеріалами елементів

конструкцій. Оскільки скінченний елемент в постановці Лагранжа завжди співпадає з матеріалом це є значною перевагою з точки зору обчислень, особливо у випадках коли присутній матеріал поведінка якого залежить від його історії. Зазвичай Лагранжову сітку використовують при вирішенні задач будівельної механіки. Головним недоліком цього підходу є втрата точності, якщо виникають значні спотворення моделі. Під

час розрахунку це може призвести до помилки і він не буде завершений [4].

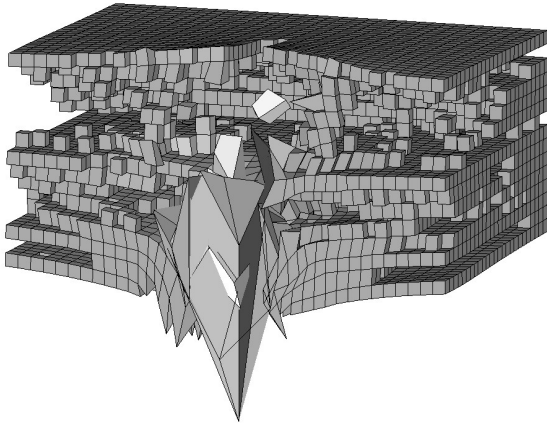


Рис.3. Приклад спотвореної моделі під дією на конструкцію імпульсного навантаження при використанні методу Лагранжа.

Fig.3. An example of a distorted model when an impulse load is applied to the structure with the use of the Lagrangian method.

МЕТОД ЕЙЛЕРА

На відміну від методу Лагранжа метод Ейлера дозволяє подолати труднощі пов'язані з великими деформаціями моделі, тому широко використовується при розв'язанні задач механіки рідин [4].

Головна ідея, що покладена в основу методу Ейлера це дві сітки, які накладаються одна на одну. Перша сітка є фоновою і повністю фіксована у просторі. Це область всередині якої кожен окремий елемент може містити декілька матеріалів. Інша сітка представляє собою матеріал, який вільно рухається в межах фіксованої області (Рис. 4).

Даний метод не позбавлений недоліків. Через те, що фонова сітка закріплена, а предмет дослідження знаходиться всередині цієї сітки її розміри повинні бути достатніми, щоб граничні умови не вплинули на результати розрахунків та була можливість охопити весь необхідний простір з матеріалом під час симуляції. Це може призвести до значної кількості скінченних елементів в моделі, що в свою чергу вплине на час розрахунку. Крім цього присутні проблеми

дисипації та дисперсії пов'язані зі значним потоком мас, що протікають через окремі елементи [5]. Такий ефект виникає в результаті того, що відбувається відокремлення вузлів матеріалу, під час руху, від фонової сітки [4].

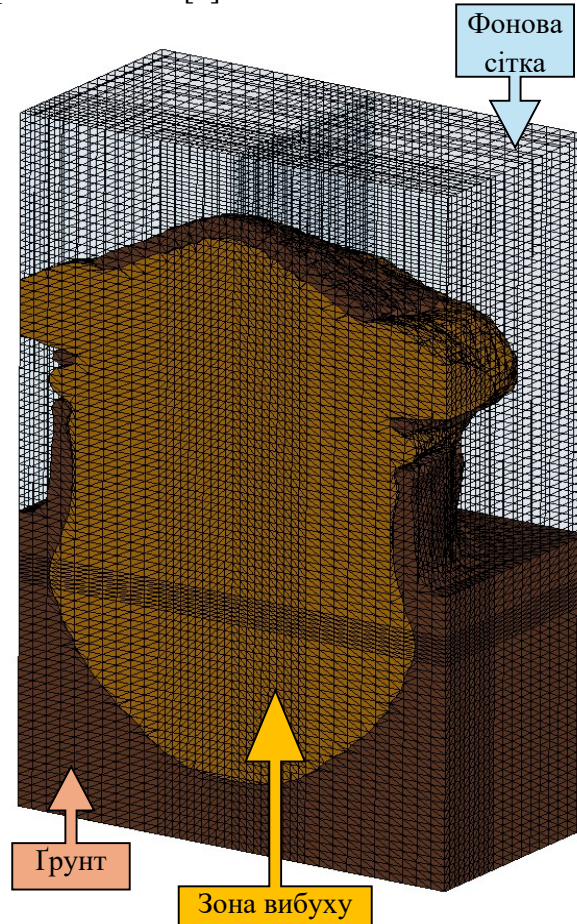


Рис.4. Моделювання підземного вибуху з використанням методу Ейлера.

Fig.4. The model of an underground blast with the use of the Eulerian method.

ДОВІЛЬНИЙ ЛАГРАНЖА-ЕЙЛЕРА (ALE)

Даний метод поєднує в собі переваги двох попередніх.

Аналогічно до чистого Ейлерового, створюються дві сітки, що накладаються одна на одну. Головною відмінністю є те, що фонова може довільно рухатися в просторі та користувач має можливість надавати їй потрібного прискорення. Це дозволяє зменшити розміри моделі, оскільки обидві сітки рухається разом, а завдяки контрольованому переміщенню та деформації фонової сітки зменшується перетікання мас між елементами, що не призводить до про-

блем пов'язаних з дисипацією та дисперсією які присутні в методі Ейлера [5]. Проте, в деяких випадках це є мінусом оскільки треба самому визначати необхідну швидкість сітки для кожної індивідуальної задачі окремо [4]. Враховуючи те що рух в просторі є контрольованим, користувач може

аналогічно до Ейлерового методу закріпити сітку скінченних елементів в просторі, тобто прискорення буде дорівнювати нулю. З цього можна зробити висновок, що метод Ейлера в даній ситуації є частковим випадком ALE.

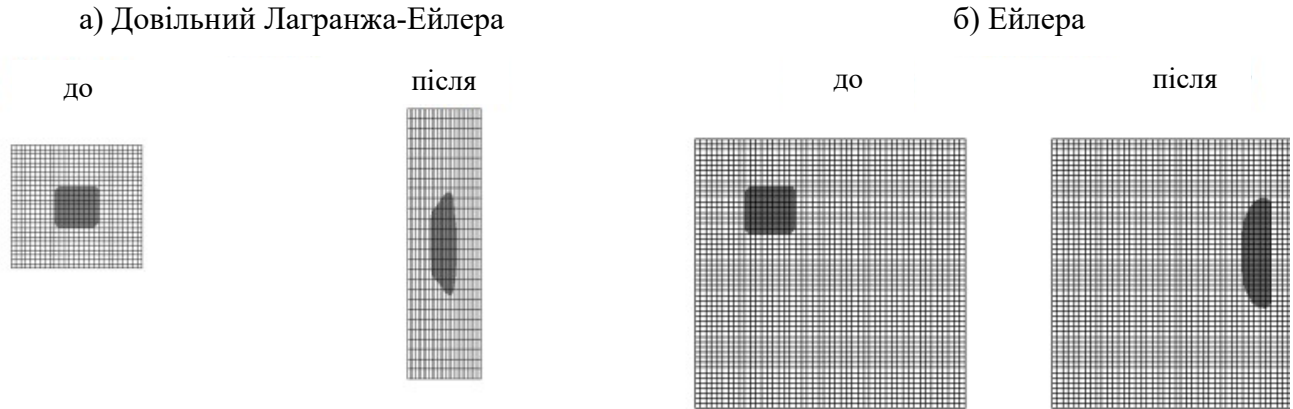


Рис.5. Різниця між підходом а) довільний Лагранжа-Ейлера, б) Ейлера на початку симуляції та після [5].

Fig.5. Difference between a) ALE, b) Eulerian approach at the beginning of the simulation and after it [5].

ГІДРОДИНАМІКА ПЛАВНИХ ЧАСТИНОК (SMOOTH PARTICLE HYDRODYNAMICS SPH)

Метод SPH є одним з варіантів Лагранжевого методу особливістю якого є відсутність сітки в класичному її розумінні. З самого початку даний метод розроблявся для розв'язання задач, що виникли в області астрофізики. Проте згодом, через свою ефективність та здатність відтворювати складні фізичні явища, SPH став дуже зручним та потужним інструментом у вирішенні широкого поля проблем механіки суцільного середовища, моделюванні різних краш тестів та пластичного і крихкого руйнування твердих тіл.

Через відсутність сітки SPH дозволяє розв'язувати задачі в яких присутня геометрія складної форми та можливі великі деформації. Широкого використання цей метод набув в гідродинаміці. Він дозволяє представити рідину, як набір окремих частинок, що рухаються зі швидкістю потоку. Кожна частинка є точкою інтерполявання, що має всі параметри рідини які нам відомі.

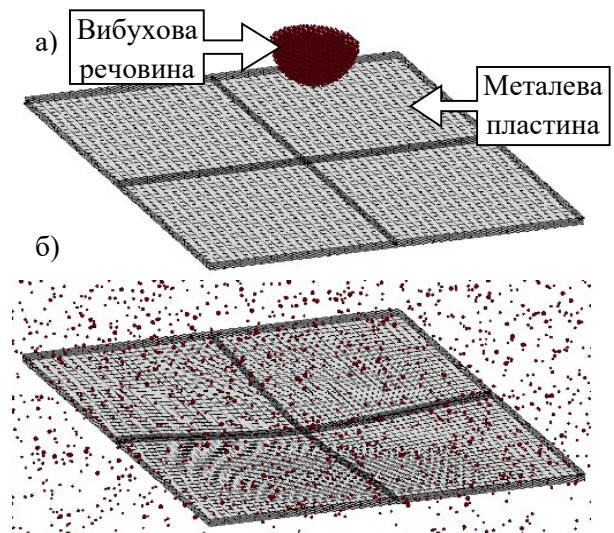


Рис.6. Моделювання дії вибуху на конструкцію за допомогою SPH методу: а) до початку розрахунку; б) після розрахунку.

Fig.6. The model of the blast effect on a structure with the use of the SPH method: a) before the start of the calculation; b) after the calculation.

Оскільки в SPH відсутня сітка необхідно дотримуватися певних умов при створенні

моделі використовуючи цей спосіб. Частинки SPH треба розміщувати регулярно з однаковою відстанню одна від одної. В результаті цього всі сусідні частинки з однаковою щільність, а отже і однаковим матеріалом будуть належать до одного початково об'єму, тобто нашої конструкції або її елемента [6].

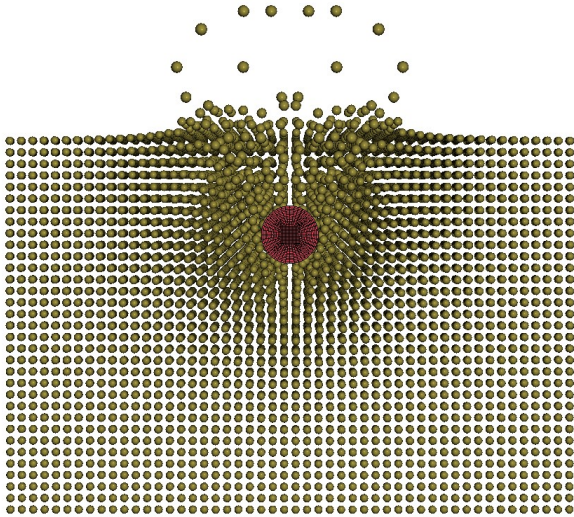


Рис.7. Проникаюча дія снаряду в ґрунтове середовище змодельоване сіткою SPH.

Fig.7. The model of projectile penetration into the soil environment in an SPH mesh.

ВИСНОВКИ ТА РЕКОМЕНДАЦІЇ

Розглянуто та описано методи побудови сітки скінченних елементів для аналізу впливу імпульсних навантажень на заглиблені споруди та ґрунтове середовище.

Встановлено, що метод Лагранжа можна застосовувати тоді, коли матеріал об'єкта, що досліджується має велику жорсткість, наприклад бетон або сталь. Конструкції з таких матеріалів не здатні сприймати великі деформації та у більшості випадків математична модель, що описує їх поведінку має критерій руйнування матеріалу, тому скінченні елементи, яким призначений такий матеріал володіють властивістю видалятися з розрахунку при досягненні заданого критерія руйнування, раніше ніж їх спотворення дійде до критичної межі.

Для моделювання поведінки ґрунтового середовища під дією вибуху краще обрати

метод побудови сітки Ейлера або метод довільний Лагранжа-Ейлера (Arbitrary Lagrangian-Eulerian ALE) оскільки жорсткість ґрунту на порядок нижче ніж бетону або сталі.

Також, є можливість комбінувати дані методи для отримання кращого результату. Якщо передбачається, що на певній ділянці конструкції виникатимуть зони з великими пластичними деформаціями можна поєднати сітку Лагранжа та підхід Гідродинаміка плавних частинок (Smooth Particle Hydrodynamics SPH), забезпечуючи спеціальними контактами їх спільну роботу. Іншим прикладом суміщення двох методів є побудова моделі заглибленої споруди за допомогою методу Лагранжа, а оточуючого ґрунтового середовища та вибухівки сіткою Ейлера. Це дасть змогу більш коректно описати роботу ґрунту та отримати наближений до реального напружено-деформований стан споруди.

Отже, залежно від середовища, матеріалу та мети розрахунку залежить вибір способу побудови числової моделі. Використовуючи належним чином той чи інший метод або ж поєднуючи їх між собою можна досягнути результатів, що будуть корелюватися з реальною поведінкою фізичних об'єктів під впливом імпульсних навантажень.

ЛІТЕРАТУРА

1. LS-DYNA Keyword user's manual. Livermore Software Technology Corporation, 2024. URL: https://ftp.lstc.com/anonymous/outgoing/web/ls-dyna_manuals/DRAFT/DRAFT_Vol_1.pdf
2. LS-DYNA Theory Manual. Livermore Software Technology Corporation, Livermore 2024. https://ftp.lstc.com/anonymous/outgoing/web/ls-dyna_manuals/DRAFT/DRAFT_Theory.pdf (дата звернення: 04.12.2024).
3. LSTC. LS-DYNA ALE (Arbitrary Lagrangian Eulerian) Capabilities Fluid Structure Interaction Modeling. 2003. URL: <https://ftp.lstc.com/anonymous/outgoing/jday/tutorial-278p.pdf> (дата зв.: 04.12.2024).
4. Donea J. Arbitrary Lagrangian-Eulerian methods/ J. Donea, A. Huerta, J.-Ph. Ponthot, A. Rodríguez-Ferran // *The Encyclopedia of Com-*

putational Mechanics, – Wiley, – 2004 – Vol. 1, Chapter 14 –P. 413-437.

5. 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> (дата звернення: 04.12.2024).
6. 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> (дата звернення: 04.12.2024).

REFERENCES

1. LS-DYNA (2024) Keyword user's manual. Livermore Software Technology Corporation. https://ftp.lstc.com/anonymous/outgoing/web/lsdyna_manuals/DRAFT/DRAFT_Vol_I.pdf
2. LS-DYNA (2024) Theory Manual. Livermore Software Technology Corporation, Livermore. https://ftp.lstc.com/anonymous/outgoing/web/lsdyna_manuals/DRAFT/DRAFT_Theory.pdf
3. LSTC. LS-DYNA ALE (Arbitrary Lagrangian Eulerian) (2003) Capabilities Fluid Structure Interaction Modeling. URL: <https://ftp.lstc.com/anonymous/outgoing/jday/aletutorial-278p.pdf>
4. Donea, J., Huerta, A., Ponthot, J.-Ph. and Rodríguez-Ferran, A. (2004) Arbitrary Lagrangian-Eulerian methods, *The Encyclopedia of Computational Mechanics*, Wiley, Vol. 1, Chapter 14, 413-437.
5. 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>.
6. 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>.

Principles of creating numerical models for studying the impact of impulse loads on underground structures

Viktor NOSENKO,
Dmytro NECHYPORENKO

Summary. The current situation in Ukraine has led to new geotechnical challenges, the solution of which is aimed at protecting critical infrastructure

facilities from the effects of explosive shock waves. Protective structures that are buried in the soil environment are built to protect critical infrastructure facilities. A necessary condition to ensure their safe operation is the assessment of the stress-strain state of the system “soil environment-shelter building”. It is important to choose an adequate phenomenological model of the behavior of the materials of the protective structure and the soil environment, which describes the work of materials under the impulse impacts. The paper analyses four methods of constructing numerical models for calculating the impact of impulse loads, namely:

1. Lagrange mesh.
2. Euler's mesh.
3. Arbitrary Lagrangian-Eulerian (ALE).
4. Smooth Particle Hydrodynamics (SPH).

Each of the methods has its advantages and disadvantages. The Lagrangian mesh enables to easily track the boundary between materials of different structures, both before and after the calculation, and it does not require much computational time. However, this method is not practical in cases of significant model deformations with rapid changes in time.

The Euler and Arbitrary Lagrange-Euler methods allow to model the problems with a large distortion of the model, such as an underground or underwater explosion. Their disadvantage is the size of the computational domain and the considerable labour intensity for the model setup.

Smooth Particle Hydrodynamics is a meshless Lagrangian method. The advantage of this method is the ability to work with large model deformations. The disadvantage is labour intensity and calculation time.

All of these methods of building a numerical model are available in the LS-Dyna software package. During the analysis of calculations in LS-Dyna, we found that it is advisable to use the Lagrange mesh to create a model of a structure made of reinforced concrete or steel due to their high stiffness. The Euler and ALE methods are preferable for soil, they enable a strong change in the geometry of the model under the influence of the blast. Different methods are combined to achieve adequate model performance and to obtain correct results that will closely match the actual behavior of structures, facilities and materials under impulse loads.

Key words. Finite element mesh, Lagrange mesh, Euler mesh, Arbitrary Lagrangian-Eulerian ALE, Smooth Particle Hydrodynamics SPH, impulse loads.