

Моделювання прориву греблі методом гідродинаміки згладжених частинок

<https://doi.org/10.31713/MCIT.2023.034>

Станіслав Довгий

Інститут телекомунікацій і глобального інформаційного простору НАН України
м. Київ, Україна

Олег Буланчук

Лабораторія математичних наук
Національний центр “МАН України”,
м. Київ, Україна
obulan65@gmail.com

Галина Буланчук

Кафедра вищої та прикладної математики
Приазовський державний технічний університет, ПДТУ
м. Дніпро, Україна
ggbulan7@gmail.com

Анотація — У даній роботі представлені результати моделювання прориву греблі в замкнутому просторі методом гідродинаміки згладжених частинок (SPH). Для моделювання були використані відкриті коди програмного пакету SPHysics, для візуалізації - безкоштовний пакет Paraview. Методика може бути розширена на більш складні випадки: наявність споруд, вологе дно та тривимірний випадок.

Ключові слова – прорив греблі; метод гідродинаміки згладжених частинок; чисельне моделювання; SPH; SPHysics.

I. ВСТУП

Моделювання техногенних катастроф, зокрема проривів греблі залишається актуальним методом прогнозування, особливо зараз, під час війни, яку розпочала Росія на території України. Вночі 6 червня 2023 року окупаційні війська Російської Федерації підірвали греблю Каховської ГЕС. Слід відмітити, що ймовірність підриву була прогнозована шведською інженерною компанією Dämmningsverket AB, яка провела відповідне математичне моделювання. Відео моделювання можна подивитись на YouTube [1]. Для моделювання було використано програмне забезпечення HEC-RAS 6.3 Інженерного корпусу армії США (SACE) [2] та дані про рельєф місцевості, отримані від NASA.

Унаслідок обстрілів військами РФ інфраструктури Києва ракетами все ще залишається загроза ушкодження і руйнування греблі Київської ГЕС. Українськими вченими був розроблений проєкт 2020.01/0421 «Прогнозування небезпечних впливів радіоактивно забруднених поверхневих вод і затоплення берегів: розвиток моделей та їх впровадження для зменшення наслідків надзвичайних ситуацій у м. Києві, спричинених водами р. Дніпро», який був виконаний в Інституті математичних машин та систем НАН України [3]. Проєкт був профінансований Національним фондом досліджень України (НФДУ).

Існує багато публікацій з даної тематики як для двовимірного, так і для тривимірного випадків, наприклад, [4, 5]. У роботі [6] описані історичні події прориву дамб, які можуть бути використати для перевірки модельних розрахунків.

II. МЕТОДИКА МОДЕЛЮВАННЯ

У даній роботі для моделювання був використаний метод гідродинаміки згладжених частинок (SPH) [7]. Розрахунки були проведені для двовимірного випадку в обмеженій області. Даний метод особливо ефективний для задач з границями області, що сильно деформуються. Метод SPH є досить популярним також в силу того, що він дозволяє використовувати для обчислень сучасні графічні процесори, де розпаралелювання реалізовано апаратно. Це дозволяє значно пришвидшити розрахунки для тривимірного випадку.

Суть методу SPH полягає в тому, що рідина поділяється на дискретні частинки, величина яких має “порядок згладжування”. У межах цієї величини всі властивості згладжуються з використанням сусідніх частинок. Основна ідея базується на інтегральному представленні функції:

$$f(x) \approx \int_a^b f(x') W(x' - x, h) dx'$$

де h – радіус згладжування. У якості функції ядра W часто використовують функцію Гауса (функцію нормального розподілу) або кубічний сплайн. Порядком точності інтерполяції визначається гладкість ядра.

В SPH методі рідина моделюється у вигляді скінченного числа частинок, які мають масу і займають певне положення в просторі. Частинки взаємодіють одна з одною через еволюційні рівняння. Неперервні інтеграли дискретизуються у вигляді квадратурних формул.

Математична модель, що описує рух рідини при прориві греблі, містить рівняння Нав'є-Стокса з

урахуванням сили тяжіння та рівняння нерозривності:

$$\frac{d\vec{v}}{dt} = -\frac{\nabla p}{\rho} + \frac{\mu}{\rho} \Delta \vec{v} + \vec{g}$$

$$\frac{d\rho}{dt} = -\rho \nabla \vec{v}$$

При програмній реалізації методу SPH використовувався наступний алгоритм:

- задавались початкові координати, швидкості, маса частинок, густина і тиск;
- задавався крок по часу;
- обчислювались сили тиску, в'язкості і гравітації;
- визначались швидкості частинок на наступному кроці;
- розраховувались координати частинок в наступний момент часу;
- для частинок, що перетинали границю області, розраховувалось відбиття частинок;
- розраховувалась густина в рівнянні нерозривності;
- обчислювався тиск по полю густини;
- здійснювався перехід на крок 3.

Проблема задоволення умови непротікання на границі може бути вирішена за допомогою різних підходів, які компенсують нестачу частинок поблизу границі.

Для розрахунків була використана платформа кодів гідродинаміки згладжених частинок SPHysics [8]. Відкритий код програмного пакету SPHysics написаний на мові високого рівня FORTRAN-95. Для візуалізації результатів розрахунків використовувався безкоштовний пакет Paraview [9].

III. РЕЗУЛЬТАТИ МОДЕЛЮВАННЯ

На рис. 1 і рис. 2 представлені результати візуалізації положення частинок при прориві греблі в різні моменти часу. Припускалось, що в початковий момент часу відбувається падіння стовпа рідини прямокутної форми. Кольорова шкала демонструє залежність кольору частинок від їх швидкості. Темно синій колір свідчить про швидкість, близьку до нуля, а яскраво-рожевий - про максимальну швидкість. Результати вказують на те, що при русі до стінки хвиля має переважно значну швидкість, але при підході до стінки швидкість сплеску при русі вгору стає значно меншою. З часом швидкість всіх частинок затухає (рис.2)

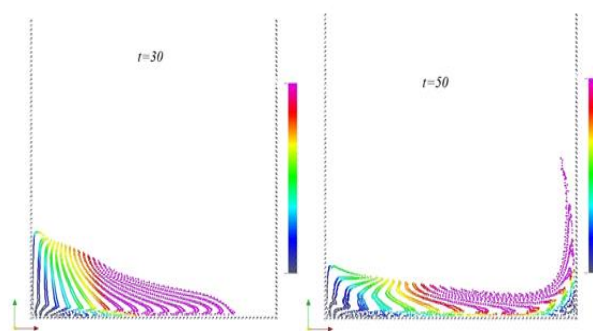


Рисунок 1. Положення частинок в момент часу t=30 і t=50

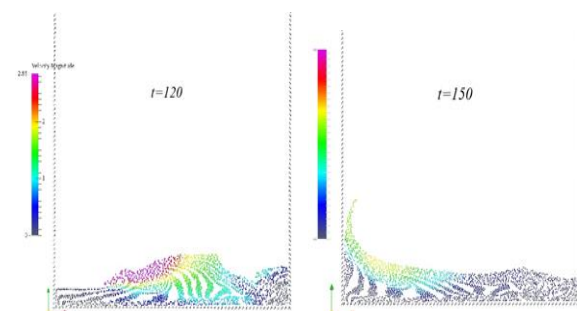


Рисунок 2. Положення частинок в момент часу t=120 і t=150

Дана методика моделювання дозволяє також врахувати більш складні граничні умови та може бути розширена на тривимірний випадок.

ЛІТЕРАТУРА

- [1] "Worst case model of a dam break at the Nova Kakhovka dam." [Online]. Available: <https://youtu.be/b587ZUKIZsI>. [Accessed: October 12, 2023].
- [2] "HEC-RAS." [Online]. Available: <https://www.hec.usace.army.mil/software/hec-ras/>. [Accessed: October 12, 2023].
- [3] "Анотований звіт про виконану роботу «Прогнозування небезпечних впливів радіоактивно забруднених поверхневих вод і затоплення берегів: розвиток моделей та їх впровадження для зменшення наслідків надзвичайних ситуацій у м. Києві, спричинених водами р. Дніпро»." [Online]. Available: https://nrfu.org.ua/wp-content/uploads/2022/01/2020.01_0421-bezhenar_028_01.2021_az.pdf. [Accessed: October 12, 2023].
- [4] M.H. Aslamia, B.D. Rogersb, P.K. Stansbyb, and A. Bottacin-Busolinc, "Complex dam break simulation using the 2-D depth-averaged SPH flow model: a validation for tsunami application," IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science, vol. 1169, 2023, 012026.
- [5] A.J. Crespo, M. Gómez-Gesteira, and R.A. Dalrymple, "Modeling Dam Break Behavior over a Wet Bed by a SPH Technique," Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering, vol. 134(6), 2008, 313-320.
- [6] F. Aureli, A. Maranzoni and G. Petaccia, "Review of Historical Dam-Break Events and Laboratory Testtop Real Topography for the Validation of Numerical Models," Water, vol. 13, 2021, 1968. <https://doi.org/10.3390/w13141968>
- [7] G.R. Liu, M.B. Liu, "Smoothed Partificle Hydrodynamics: a meshfree particle method," World Scientific Publishing Company, 2003.
- [8] "SPHYSICS Home Page – SPHYSICS." [Online]. Available: https://wiki.manchester.ac.uk/sphysics/index.php/Main_Page. [Accessed: October 12, 2023].
- [9] "ParaView - Open-source, multi-platform data analysis and visualization application." [Online]. Available: <https://www.paraview.org/>. [Accessed: October 12, 2023].