

БАГРІЙ Олена

Хмельницький національний університет

ORCID ID: [0000-0003-2267-7162](https://orcid.org/0000-0003-2267-7162)e-mail: [bahrio@khmnu.edu.ua](mailto:bahrio@khmnu.edu.ua)

## ПРОГРАМНА РЕАЛІЗАЦІЯ ІТЕРАЦІЙНИХ АЛГОРИТМІВ ДЛЯ РОЗВ'ЯЗАННЯ ПЛОСКОЇ ФІЗИЧНО НЕЛІНІЙНОЇ ЗАДАЧІ

Розглядається нелінійний програмний блок до спеціалізованого програмного комплексу GEO, що дозволяє враховувати особливості деформування дискретного середовища та моделювати процес деформування плоскої області, заповненої дискретним матеріалом.

Ключові слова: ітераційний алгоритм, нелінійний програмний блок, дискретне середовище, внутрішнє тертя.

BAHRII Olena

Khmelnitskyi National University

### SOFTWARE IMPLEMENTATION OF ITERATIVE ALGORITHMS FOR SOLVING A PLANAR PHYSICALLY NONLINEAR PROBLEM

To solve physically nonlinear problems, specialized software solutions based on the procedures of MSE, FDM, BEM, etc. are used. The article provides an overview of software complexes that allow solving problems in various fields of science and technology. To solve a planar physically nonlinear problem, it is irrational to use the considered systems in most cases since they are closed software complexes, making it impossible to modify the algorithm partially. The difference between software systems is only in the "nonlinear" part, where a specific algorithm for solving a specific problem is implemented. The proposed software implementation of iterative algorithms for solving a plane physically nonlinear problem consists of several independent modules, each of which performs a separate calculation stage. The principle of the iterative algorithm is that a complex physically nonlinear problem is solved step by step. At each stage, a linear problem is solved, in which the values of the deformation parameters are assigned depending on the level of stresses and strains in each element reached at the previous stage. The iterative algorithm is implemented based on the specialized GEO software package developed at the Department of Strength of Materials of KhNU. The complex implies the possibility of replacing a "nonlinear" program block, depending on the type of nonlinear relations adopted in the model. The nonlinear block considered the features of the deformation of a discrete medium, namely, the accepted nonlinear dependencies of a particular material. In the calculation process, the divergence with the linear solution is checked at each iteration until the required accuracy is achieved. This allows simulating the deformation process of a flat area filled with a discrete material.

Keywords: iterative algorithm, non-linear program block, discrete environment, internal friction.

#### Постановка проблеми у загальному вигляді

##### та її зв'язок із важливими науковими чи практичними завданнями

Існує велика кількість спеціалізованих програм для розв'язання фізично нелінійних задач на основі процедур МСЕ, МСР, МГЕ та ін. Серед них є універсальні програмні комплекси, які дозволяють розв'язувати задачі в різних галузях науки і техніки, наприклад, комп'ютерні програмні комплекси SolidWorks [1], „Plaxis” [2], автоматизовані системи наукових досліджень АСНД „VESNA” (КНУБА) [3], „ЛІРА” (О.С. Городецький) [4], „SKAD” (А.В. Перельмутер) [5], „CONCORD” (С.Ф. Клованич) [6] та ін.

Для розв'язання сформульованої у [7] нелінійної задачі використовувати ці системи в більшості випадків нераціонально, оскільки це закриті програмні комплекси, що робить неможливою часткову модифікацію алгоритму рішення задачі у випадку виникнення такої потреби.

Більш придатними для дослідницьких цілей є спеціалізовані програмні комплекси, розраховані на розв'язання одного класу задач. Комплекси для розв'язання задач, пов'язаних з дослідженням напружено-деформативного стану ґрунтового середовища, розроблені під керівництвом А.К. Бугрова (ЛПІ) [8], А.Л. Гольдіна (ВНДІГ) [9], Ю.К. Зарецького (Гідропроєкт) [10], В.В. Ковтуна (ХНУ) [11], І.П. Бойка (КНУБА) [12], В.О. Грішина (ОНМУ) [13] та ін.

Ці програмні комплекси використовують процедурні мови програмування, що дозволяє легко видозмінювати окремі підпрограми, пристосовуючи їх для нових умов задач.

#### Формулювання цілей статті

Метою роботи є розробка нелінійного програмного блока до спеціалізованого програмного комплексу GEO, що дозволить враховувати особливості деформування дискретного середовища та моделювати процес деформування плоскої області, заповненої дискретним матеріалом.

#### Виклад основного матеріалу

Для розв'язання будь-яких задач методом скінчених елементів використовуються схожі процедури підготовки дискретної моделі розрахункової області, розв'язання системи лінійних алгебраїчних рівнянь, формування кінцевих результатів у зручній для користувача формі. Відмінність програмних комплексів полягає тільки в „нелінійній” частині, де реалізується специфічний алгоритм розв'язку конкретної задачі. Розглянемо декілька найпоширеніших програмних продуктів в даній області.

## **COSMOS**

Для розв'язку крайових задач широко використовують метод скінчених елементів (МКЕ), на базі якого розроблена система COSMOS/M.

Пакет COSMOS/M розроблено корпорацією структурних досліджень та аналізу (Structural Research and Analysis Corporation) (США). Він відноситься до найбільш поширених у світі.

Структура пакета побудована на основі окремих модулів. Пакет є відкритою системою і має можливість подальшого вдосконалення та підключення нових модулів. Бібліотеки матеріалів можуть бути додатково доповнені користувачем. Програма дозволяє будувати епюри, графіки, кольорові заливки, ізоповерхні, „розрізи” тіл, анімацію для виведення результатів всіх видів розрахунку.

Набір розрахункових модулів охоплює більшість випадків, що зустрічаються в інженерній практиці, включаючи комплексний аналіз.

Скінчені елементи згруповано в бібліотеці системи COSMOS/M, в семи різних групах. При розв'язанні задач, більшість груп елементів можна замінити на іншу з мінімальною модифікацією вхідних даних.

## **Nastran**

Програмний продукт компанії MSC.Software – MSC.Nastran – це одна з кращих скінчено-елементних програм. MSC.Nastran забезпечує розрахунок напружено-деформованого стану, власних частот і форм коливань, аналіз стійкості, рішення завдань теплопередачі, дослідження сталих і несталих процесів, акустичних явищ, нелінійних статичних процесів, нелінійних динамічних перехідних процесів, розрахунок критичних частот і вібрацій роторних машин, аналіз частотних характеристик при впливі випадкових навантажень, спектральний аналіз. Передбачено можливість моделювання великого списку матеріалів, включаючи композитні й гіперпружні. Розширені функції включають технологію суперелементів (підконструкцій), модальний синтез і макромову DMAP для створення користувальницьких додатків.

MSC.Nastran може також використовуватись для оптимізації проектів. Оптимізацію можна проводити для задач статички, стійкості, динамічних перехідних процесів, власних частот і форм коливань, акустики. Завдяки своїй ефективності алгоритми оптимізації обробляють необмежене число проектних параметрів й обмежень.

MSC.Nastran застосовується також для планування експериментів і оцінки повноти отриманих експериментальних даних.

Основу MSC.Nastran складають відпрацьована технологія елементів і надійні чисельні методи. Програма дозволяє одночасно застосовувати в одній і тій же моделі h- і p-елементи для досягнення точності розрахунку при мінімальних комп'ютерних ресурсах. Елементи високого порядку апроксимації – p-елементи – добре відбивають криволінійну геометрію конструкції і забезпечують високу точність при детальному розрахунку напружень. Ці елементи автоматично адаптуються до бажаного рівня точності.

Тісний зв'язок MSC.Nastran з MSC.Patran забезпечує повністю інтегроване середовище для моделювання й аналізу результатів. MSC.Nastran гнучко інтегрується в багато середовищ проектування.

## **Ansys**

Програма ANSYS – це гнучкий, надійний засіб проектування й аналізу. Особливістю програми є файлова сумісність всіх членів сімейства ANSYS для всіх використовуваних платформ. Багатоцільова спрямованість програми (тобто реалізація в ній засобів для опису відклику системи на впливи різної фізичної природи) дозволяє використати ту саму модель для рішення таких зв'язаних завдань, як міцність при тепловому навантаженні, вплив магнітних полів на міцність конструкції, тепломасоперенос в електромагнітному полі.

Програма пропонує перелік розрахункових засобів, які можуть врахувати різноманітні конструктивні нелінійності; дають можливість вирішити загальний випадок контактної задачі; допускають наявність більших (кінцевих) деформацій і кутів повороту; дозволяють виконати інтерактивну оптимізацію і аналіз впливу електромагнітних полів, одержати рішення задач гідроаеродинаміки разом з параметричним моделюванням, адаптивним перебудуванням сітки, використанням p-елементів і великих можливостей створення макрокоманд із допомогою мови параметричного проектування програми ANSYS (APDL).

Модуль програми ANSYS Design Data Access (DDA) забезпечує передачу в програму моделей, створених засобами комп'ютерного проектування (CAD), що виключає повторення виконаної раніше роботи. Програмні засоби серії DDA Connection можуть працювати разом з розробками багатьох провідних постачальників CAD-програм, включаючи компанії Parametric Technology Corporation, EDS/Unigraphics і Computervision Corporation. Можливості аналізу і оптимізації програми ANSYS легко переносяться на CAD-моделі за рахунок використання форматів IGES й STEP для пересилання геометрії або відповідного інтерфейсу CAD-програм.

Графічні можливості забезпечуються повністю інтерактивною графікою, що є складовою програми ANSYS. Графіка важлива для перевірки вихідних даних і перегляду результатів рішення на етапі постпроцесорної обробки.

Модуль PowerGraphics має значну швидкість побудови геометричних об'єктів і графіків результатів. Засоби візуалізації цього модуля придатні для зображення елементів сітки й областей рівних значень напружень як при використанні p-елементів, так і h-елементів. Можливості модуля PowerGraphics дозволяють швидко видавати зображення: ізоповерхонь; графічних об'єктів, розділених на складові частини у вигляді однієї збірки або сукупності так званих Q-розрізів.

Проаналізувавши програмні середовища, можна зробити висновок, що існуючі системи не розглядають плоску нелінійну задачу механіки дискретних матеріалів в потрібній постановці і тим самим не враховують багато важливих факторів, що безумовно впливає на якість кінцевого результату. Також для вирішення поставленої задачі іноді виникає необхідність деякого корегування роботи програми, а отже використання готових програмних комплексів є не завжди раціональним. Більш ефективними для такого використання є пакети прикладних програм. В цьому напрямку виконані роботи В.О. Грішина, В.В. Ковтуна, О.А. Дорофєєва, С.С. Ковальчука.

До такого типу програм відноситься і запропонований програмний продукт. Програма складається з декількох незалежних модулів, кожен з яких виконує окремий етап розрахунку. Ця структура має наступні переваги:

- програміст може легко модифікувати систему, додавати нові компоненти вносячи нову функціональність;
- дозволяє швидко розробляти систему розподіляючи роботу між кількома програмістами;
- легко виявляти і видаляти помилки.



Рис. 1. Функціональна блок-схема програмного комплексу

Описаний в [14] ітераційний алгоритм розв'язання фізично нелінійної плоскої крайової задачі реалізований на основі розробленого на кафедрі опору матеріалів ХНУ [11] спеціалізованого програмного комплексу GEO. Комплекс передбачає можливість заміни "нелінійного" програмного блоку в залежності від виду прийнятих в моделі нелінійних співвідношень. Для використання в розрахунках співвідношень [7] розроблено спеціальний нелінійний блок Non-Linear. На рис. 1 представлена функціональна блок-схема програмного комплексу.

Програмний комплекс виконує наступні етапи розрахунку:

1. Введення вихідних даних: характеристики матеріалу (модуль Юнга, коефіцієнт Пуассона – визначають експериментально), умови закріплення, відомі переміщення та навантаження у граничних точках.
  2. Побудова дискретної моделі розрахункової області: автоматична розбивка на елементи, формування векторів вузлових сил та відомих вузлових переміщень.
  3. Формування матриць жорсткості елементів.
  4. Формування матриці жорсткості системи.
  5. Формування та розв'язання системи лінійних рівнянь методу переміщень і визначення вузлових переміщень.
  6. Обчислення деформацій та напружень.
  7. Розв'язання нелінійної задачі з урахуванням прийнятих нелінійних залежностей конкретного матеріалу.
  8. Перевірка розходження.
  9. Формування результатів розрахунку.
- Етапи 1–6 належать до стандартного розв'язання лінійної задачі МСЕ. Вони реалізовані на основі алгоритму, використаного в програмному комплексі GEO. Етапи 7, 8 реалізують оригінальний алгоритм, описаний у [14]. Результати розрахунку виводяться у вигляді таблиці в текстовому редакторі Word.

#### **Висновки з даного дослідження і перспективи подальших розвідок у даному напрямі**

На основі описаного у [14] алгоритму створено нелінійний блок Non-Linear програмного комплексу GEO. Блок враховує особливості деформування дискретного середовища, а програмний комплекс з новим нелінійним блоком дозволяє моделювати процес деформування плоскої області, заповненої дискретним матеріалом.

#### **Література**

1. Програмний комплекс SolidWorks. URL: <https://www.solidworks.com/>
2. PLAXIS Geotechnical Analysis Software. URL: <https://www.bentley.com/en/products/brands/plaxis>
3. Автоматизована система наукових досліджень (АЧНД) «VESNA». URL: [https://www.knuba.edu.ua/ukr/?page\\_id=934](https://www.knuba.edu.ua/ukr/?page_id=934)
4. Багатофункціональний програмний комплекс ЛІРА-САПР. URL: <https://www.liraland.ua/lira/>
5. SCAD Office. Вычислительный комплекс SCAD / В. С. Карпиловский, Э. З. Криксунов, А. А. Маляренко, М. А. Микитавренко, А. В. Перельмутер, М. А. Перельмутер. – СКАД СОФТ, 2012. – 657 с.
6. Клованич, С. Ф. Метод конечных элементов в расчетах пространственных железобетонных конструкций / С. Ф. Клованич, Д. И. Безушко. – Одесса : Изд-во ОНМУ, 2009. – 89 с.
7. Bagrii O. V. Plane problem of discrete environment mechanics. Problems of Tribology. 2022. № 2. P. 104–111.
8. Бугров А. К. Численное решение физически нелинейных задач для грунтовых оснований / А. К. Бугров, К. К. Гребнев // Основания, фундаменты и механика грунтов. – 1977. – № 3. – С. 39–42.
9. Гольдин А. Л. Плоская задача физически нелинейной упругой грунтовой среды / А. Л. Гольдин // Известия ВНИИГ. – 1968. – Т. 87. – С. 169–174.
10. Зарецкий Ю. К. Статика и динамика грунтовых плотин / Ю. К. Зарецкий, В. Н. Ломбардо. – М. : Энергия, 1983. – 256 с.
11. Ковтун В. В. Программный комплекс для решения задач нелинейной механики грунтов с помощью ЭВМ / В. В. Ковтун // Современные проблемы нелинейной механики грунтов. – Челябинск, 1985. – С. 136–137.
12. Сахаров В. О. Модель нелінійного деформування ґрунтової основи для розв'язання геотехнічних задач прибудови / В. О. Сахаров // Основи і фундаменти : міжвід. наук.-техн. зб. КНУБА. – 2005. – Вип. 29. – С. 8–19.
13. Гришин В. А. Нелинейные модели конструкций, взаимодействующих с грунтовой средой / В. А. Гришин, В. С. Дорофеев – Одесса : Внешрекламсервис, 2006. – 242 с.
14. Багрій О. В. Ітераційні алгоритми рішення плоскої задачі для середовища з суттєвим проявом внутрішнього тертя / О. В. Багрій // Вісник Хмельницького національного університету. Технічні науки. – 2022. – № 4. – С. 44–48.

## References

1. Prohramnyi kompleks SolidWorks. URL: <https://www.solidworks.com/>
2. PLAXIS Geotechnical Analysis Software. URL: <https://www.bentley.com/en/products/brands/plaxis>
3. Avtomatyzovana sistema naukovykh doslidzen (ASND) «VESNA». URL: [https://www.knuba.edu.ua/ukr/?page\\_id=934](https://www.knuba.edu.ua/ukr/?page_id=934)
4. Bahatofunktsionalnyi prohramnyi kompleks LIRA-SAPR. URL: <https://www.liraland.ua/lira/>
5. SCAD Office. Vychislitel'nyj kompleks SCAD / V. S. Karpilovskij, Je. Z. Kriksunov, A. A. Maljarenko, M. A. Mikitavrenko, A. V. Perel'muter, M. A. Perel'muter. – SKAD SOFT, 2012. – 657 s.
6. Klovanich, S. F. Metod konechnykh jelementov v raschetah prostranstvennykh zhelezobetonnykh konstrukcij / S. F. Klovanich, D. I. Bezushko. – Odessa : Izd-vo ONMU, 2009. – 89 s.
7. Bagrii O. V. Plane problem of discrete environment mechanics. Problems of Tribology. 2022. № 2. R. 104–111.
8. Bugrov A. K. Chislennoe reshenie fizicheski nelinejnykh zadach dlja gruntovykh osnovanij / A. K. Bugrov, K. K. Grebnev // Osnovaniya, fundamenti i mehanika gruntov. – 1977. – № 3. – S. 39–42.
9. Gol'din A. L. Ploskaja zadacha fizicheski nelinejnoj uprugoj gruntovoj sredy / A. L. Gol'din // Izvestija VNIIG. – 1968. – T. 87. – S. 169–174.
10. Zareckij Ju. K. Statika i dinamika gruntovykh plotin / Ju. K. Zareckij, V. N. Lombardo. – M. : Jenergija, 1983. – 256 s.
11. Kovtun V. V. Programmnyj kompleks dlja reshenija zadach nelinejnoj mehaniki gruntov s pomoshh'ju JeVM / V. V. Kovtun // Sovremennye problemy nelinejnoj mehaniki gruntov. – Cheljabinsk, 1985. – S. 136–137.
12. Sakharov V. O. Model nelinejnogo deformuvannia gruntovoi osnovy dlja rozv'iazannia heotekhnichnykh zadach prybudovy / V. O. Sakharov // Osnovy i fundamenti : mizhvid. nauk.-tekhn. zb. KNUBA. – 2005. – Vyp. 29. – S. 8–19.
13. Grishin V. A. Nelinejnye modeli konstrukcij, vzaimodejstvujushchih s gruntovoj sredoj / V. A. Grishin, V. S. Dorofeev – Odessa : Vneshreklamservis, 2006. – 242 s.
14. Bahrii O. V. Iteratsiini alhorytmy rishennia ploskoj zadachi dlja seredovyshcha z suddiivym proiavom vnutrishnoho tertia / O. V. Bahrii // Herald of Khmelnytskyi National University. – 2022. – № 4. – S. 44–48.

Надійшла/Paper received : 29.09.2022 р.    Надрукована/Printed : 01.11.2022 р.