

Алгоритм розв'язання системи лінійних та нелінійних рівнянь напіваналітичним методом скінчених елементів для криволінійних неоднорідних призматичних тіл

Юрій Максим'юк¹, Марина Гончаренко², Іван Мартинюк³, Олександр Максим'юк⁴

^{1,2,3,4}Київський національний університет будівництва і архітектури
31, просп. Повітрофлотський, Київ, Україна, 03037

¹maksymiuk.iuv@knuba.edu.ua, <http://orcid.org/0000-0002-5814-6227>

²goncharenko.mv@knuba.edu.ua, <http://orcid.org/0000-0002-7396-5335>

³ivan.martinyuk@gmail.com, <http://orcid.org/0000-0001-7957-2068>

⁴sashamaksymiuk@gmail.com, <http://orcid.org/0000-0002-2367-3086>

DOI: 10.32347/2522-4182.7.2020.101-108

Анотація. Реалізовано алгоритм методу блочних ітерацій розв'язання лінійних і нелінійних рівнянь напіваналітичним методом скінчених елементів для криволінійних неоднорідних призматичних тіл.

Матриця системи розв'язувальних рівнянь напіваналітичного методу скінчених елементів при розгляді неоднорідних призматичних тіл, незалежно від вибору системи координатних функцій, є повністю заповненою та складається з блоків, кожен з яких володіє стрічковою структурою. Вирішення систем з матрицею такого виду найбільш раціонально проводити методом блочних ітерацій. Оскільки розроблений підхід орієнтований на розгляд процесів пружної та пружно-пластичної деформації, рішення систем лінійних та нелінійних рівнянь виконується з використанням єдиного алгоритму, що представляє собою поєднання крокового методу інтегрування та параметру методу блочних ітерацій.

При розгляді фізично нелінійних задач матриця жорсткості формується з припущенням пружної роботи матеріалу. Обчислення елементів матриці жорсткості для геометрично нелінійних задач проводиться відповідно тих же формул, однак всі величини, які в них входять, визначені у змінній відліковій конфігурації на кожному кроці по параметру.

Розроблена методика вирішення фізично та геометрично нелінійних задач для масивних та тонкостінних неоднорідних криволінійних призматичних об'єктів представлених у вигляді комплексу прикладних програм, які реалізовані в Науково-дослідному інституті будівельної механіки Київського національного університе



Максим'юк Юрій
професор кафедри будівельної
механіки
д.т.н., професор



Гончаренко Марина
доцент кафедри будівельної
механіки
к.т.н., доц.



Мартинюк Іван
докторант кафедри будівельної
механіки
к.т.н.



Максим'юк Олександр
аспірант КНУБА

ту будівництва і архітектури, що орієнтується на персональні електронні обчислювальні машини, операційна система MS WINDOWS.

Комплекс прикладних програм написаний на алгоритмічних мовах високого рівня FORTRAN Power Station і C.

Ключові слова. Метод скінчених елементів (МСЕ); напіваналітичний метод скінчених елементів (НМСЕ); лінійні і нелінійні рівняння, криволінійні неоднорідні призматичні тіла; метод блочних ітерацій (МБІ); комплекс прикладних програм (КПП).

ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМИ

Вибір оптимального з точки зору витрат машинного часу та швидкості збіжності ітераційного процесу алгоритму вирішення систем лінійних та нелінійних рівнянь НМСЕ є важливим фактором, що впливає на ефективність методу в цілому. Як показали численні дослідження, використання МБІ до вирішення систем рівнянь НМСЕ [1,2] для призматичних тіл зі змінними параметрами має ряд важливих переваг у порівнянні з вирішенням систем традиційного варіанта МСЕ.

При організації обчислювального процесу та його програмній реалізації враховані основні вимоги, які висуваються до програмного забезпечення розрахунку міцності на сучасних персональних гаджетах. Модульна структура розробленої системи програм забезпечує її не замкненість відносно нових класів задач.

АЛГОРИТМ ВИРІШЕННЯ СИСТЕМ ЛІНІЙНИХ ТА НЕЛІНІЙНИХ РІВНЯНЬ. ОСОБЛИВОСТІ ВИЗНАЧЕННЯ ВЕЛИЧИН, ЩО ВХОДЯТЬ

Матриця системи розв'язувальних рівнянь НМСЕ при розгляді неоднорідних призматичних тіл, незалежно від вибору системи координатних функцій, є повністю заповненою та складається з блоків, кожен з яких володіє стрічковою структурою. Вирішення систем з матрицею такого виду найбільш раціонально проводити МБІ. Оскільки розроблений підхід орієнтований на розгляд процесів пружної та пружно-пластичної деформації, рішення систем лінійних та нелінійних рівнянь виконується з використанням єдиного алгоритму, що представляє собою поєднання крокового методу інтегрування та параметру МБІ:

$$\{U_l\}_{n+1}^m = \{U_l\}_n^m + \omega_{on} [K_{ll}]^{-1} (\{Q_l\}^m - \{R_l\}_n^m) \quad (1)$$

Тут прийняті наступні позначення:

m - номер кроку;

$\{U_l\}_n^m, \{U_l\}_{n+1}^m$ - коефіцієнти розкладання

вектора вузлових переміщень та ітераційх n та $n+1$;

ω_{on} - параметр релаксації ($1 \leq \omega < 2$); K_{ll}

- діагональна підматриця матриці жорсткості системи;

$\{Q_l\}^m$ - вектор вузлових навантажень;

$\{R_l\}_n^m$ - вектор вузлових реакцій на ітерації n .

Елементи діагональних підматриць ($[K_{ll}]$) визначають шляхом повузлового обходу дискретної моделі та підсумовування відповідних коефіцієнтів матриць жорсткості кінцевих елементів, що примикає до даного вузла. При розгляді фізично нелінійних задач матриця жорсткості формується з припущенням пружної роботи матеріалу. Обчислення елементів матриці жорсткості для геометрично нелінійних задач проводиться відповідно тих же формул, однак всі величини, які в них входять, визначені у змінній відліковій конфігурації на кожному кроці по параметру. Коректність такого підходу при вирішенні геометрично нелінійних задач показана в [1-6].

Вектор вузлових навантажень $\{Q_l\}^m$

формується на кожному кроці навантаження. Для отримання виразу його компонент запишемо варіацію роботи зовнішніх сил для одного з вузлів:

$$\delta A = \sum_{S_1=\pm 1} \sum_{S_2=\pm 1} \int_{-1}^1 q_{m(S_1 S_2)} \delta U_{m(S_1 S_2)} \sqrt{g} dx^3 \quad (2)$$

Вузлові значення зовнішніх навантажень $q_{m(S_1 S_2)}$ обчислюються шляхом інтегрування прикладеного навантаження q по області поперечного перерізу тіла, яке виконується кількісно по формулі трапецій. Розкладемо в ряд по координатним функці-

ям вузлові значення переміщень у відповідності з

$$u_{m'}(s_1, s_2) = \sum_{l=0}^L u_{m'}^l(s_1, s_2) \varphi^l.$$

Тоді

$$\delta A = \sum_{s_1=\pm 1} \sum_{s_2=\pm 1} \int_{-1}^1 q_{m'(s_1, s_2)} \sum_{l=0}^L \delta U_{m'(s_1, s_2)}^l \varphi^{(l)} \sqrt{g} dx^3 \quad (3)$$

або

$$\delta A = \sum_{s_1=\pm 1} \sum_{s_2=\pm 1} \sum_{l=0}^L q_{m'(s_1, s_2)}^l \delta U_{m'(s_1, s_2)}^l \quad (4)$$

де через $q_{m'(s_1, s_2)}^l$ - компоненти вектору $\{Q_l\}$, які визначаються за формулою:

$$q_{m'(s_1, s_2)}^l = \int_{-1}^1 q_{m'(s_1, s_2)}^l \varphi^{(l)} \sqrt{g} dx^3 \quad (5)$$

Після проведення по третій координаті кількісне інтегрування по формулі Гауса, отримуємо:

$$q_{m'(s_1, s_2)}^l = \sum_{K=1}^N (q_{m'(s_1, s_2)} \varphi^{(l)} \sqrt{g})_K H_K \quad (6)$$

Компоненти вектора вузлових реакцій $\{R_l\}_n^m$ визначається шляхом підсумовування відповідних компонентів $\{r_l\}$ та ітерації n .

Компоненти вектора $\{r_l\}$ обчислюються відповідно до формул наведених в роботах [7, 89]. Для випадку силового навантаження значення векторів напруження та їх похідних, що входять у вираз для $\{r_l\}$ визначаються із співвідношення:

$$\sigma^{ij} = C^{ijmn} \varepsilon_{mn}^e \quad (7)$$

При розрахунках конструкцій на теплові впливи напруження обчислюються через температурні деформації. Коефіцієнти розкладу температурних складових деформації в ряд Маклорена виражаємо через вузлові значення вектора температур:

$$\varepsilon_{ij}^{0\theta} = \frac{1}{4} \sum_{s_1=\pm 1} \sum_{s_2=\pm 1} \alpha_T T_{(s_1, s_2)} g_{ij}^0, \quad 8$$

$$\varepsilon_{\alpha(\alpha), (3-\alpha)}^{0\theta} = \frac{1}{4} \sum_{s_1=\pm 1} \sum_{s_2=\pm 1} \alpha_T T_{(s_1, s_2)} (2S_{(3-\alpha)}^0 g_{\alpha(\alpha)}^0 + 2Z_{\alpha}^{0, m'} Z_{\alpha}^{0, m'}).$$

$$\varepsilon_{3\alpha, (3-\alpha)}^{0\theta} = \frac{1}{4} \sum_{s_1=\pm 1} \sum_{s_2=\pm 1} \alpha_T T_{(s_1, s_2)} (2S_{(3-\alpha)}^0 g_{3\alpha}^0 + Z_{\alpha}^{0, m'} Z_{\alpha}^{0, m'} + Z_{\alpha}^{0, m'} Z_{\alpha}^{0, m'} + Z_{\alpha}^{0, m'} Z_{\alpha}^{0, m'}).$$

$$\varepsilon_{33, \alpha}^{0\theta} = \frac{1}{4} \sum_{s_1=\pm 1} \sum_{s_2=\pm 1} T_{s_1, s_2} (2S_{\alpha}^0 g_{33}^0 + 2Z_{\alpha}^{0, m'} Z_{\alpha}^{0, m'}).$$

Представимо співвідношення (8) у векторному вигляді

$$\begin{cases} \varepsilon^{0\theta} \\ \varepsilon^{0\theta} \end{cases} = [L] \{T\}, \quad (9)$$

де

$$\{T\}^T = \{T_{(-1, -1)}\} \{T_{(1, -1)}\} \{T_{(1, 1)}\}^T \quad (10)$$

Оскільки зв'язок між напруженнями та деформаціями здійснюється відповідно до закону Гука, то для напружень, викликаних діями температури, можна записати:

$$\begin{cases} \sigma^{0\theta} \end{cases} = [C] \{\varepsilon\} \quad (11)$$

У випадку, коли об'єкт зі змінними фізико-механічними характеристиками та постійною геометрією піддадуть температурному навантаженню при обчисленні напружень, відбудуться відповідні спрощення.

Напруження та її похідні, корегуються при виникненні деформацій пластичності [10] та повзучості [11, 12] відповідно прийнятому закону стану по методиці, аналогічній [13].

Збільшення напружень на кожній ітерації знаходяться по збільшенням деформацій відповідно до закону Гука, потім здійснюється корегування компонент девіатору напружень.

Коли процес деформування перетікає при таких швидкостях та температурі, що деформаціями повзучості можна знехтувати, корегування здійснюється у відповідності з прийнятими умовами текучості

$$f_p = \frac{1}{2} S_{ij} S^{ij} - \tau_s^2(\chi, T) = 0 \quad (12)$$

Через S_n^{*ij} визначені компоненти діватора після корегування:

$$S_n^{*ij} = S_n^{ij} \frac{\tau_S}{I} \quad (13)$$

При одночасному виникненню деформацій пластичності та повзучості на початку кожного кроку у часі обчислюється межа повзучості.

Межа повзучості залежить від температури, параметра зміцнення та швидкості деформацій повзучості та визначається ітераційним шляхом:

$$\tau_c^m = \left[\frac{\varepsilon_c^{n-1}}{\alpha} (\psi)^\beta \right]^{\frac{1}{\gamma}}, \quad \tau_c^m = \left[\frac{\varepsilon_c^{n-1}}{\alpha} (\psi)^\beta \right]^{\frac{1}{\gamma}}, \quad (14)$$

де

α , β та γ - контакти, що визначені для даного матеріалу при даній температурі;

ε_c^{n-1} - швидкість деформації повзучості, обчислена на ітерації $n-1$.

Потім проводиться порівняння τ_s та τ_c . При $\tau_c \leq \tau_s$ деформації пластичності відсутні та корегування напружень проводиться описаним раніше способом тільки на величину деформацій повзучості. При $\tau_c > \tau_s$ можуть розвиватися тільки деформації пластичності.

У роботі [1,2] при вирішенні фізично та геометрично нелінійних задач [14-16] у плоскій та вісесиметричній постановці запропонована модифікація метода Ньютона-Канторовича, основана на екстраполяції вектора переміщень, обчисленим на попередньому кроці по параметру.

Ефективність застосування екстраполяції вектора переміщень при використанні МБІ досліджена на задачі про пласку осадку бруса квадратного перерізу між шорсткими пласко-паралельними плитами. Максимальний ступінь осадки по висоті склала 15%.

Поеднання МБІ з екстраполяціями вектора переміщень для цієї задачі дає скорочення числа ітерацій більше, ніж у 5 разів у порівнянні з немодифікованим алгоритмом при збереженні точності отримуваних результатів.

СТРУКТУРА ОБЧИСЛЮВАЛЬНОГО КОМПЛЕКСУ

Розроблена методика вирішення фізично та геометрично нелінійних задач для масивних та тонкостінних неоднорідних криволінійних призматичних об'єктів представлених у вигляді КПП, які реалізовані в Науково-дослідному інституті будівельної механіки КНУБА, що орієнтується на ПЕОМ, операційна система MSWINDOWS. КПП написаний на алгоритмічних мовах високого рівня FORTRAN Power Station і С.

Організаційно обчислювальний комплекс PRIZ представляє подальший розвиток системи «МІЦНІСТЬ» і розроблений у відповідності з основними принципами побудови проблемно-орієнтованих пакетів програм. При створенні комплексу дотримувалась модульність його структури, що забезпечує незамкненість пакету прикладних програм PRIZ відносно нових класів досліджуваних об'єктів, типів крайових задач і алгоритмам обчислювальних процесів.

У теперішній час існує два розділи проблемно-орієнтованих підсистем PRIZ: вирішення задач термопластичності здійснюється розділом PRIZPL; для дослідження геометрично нелінійних об'єктів слугує розділ PRIZGL. Організаційна структура розділів представлена на рис. 1.

PRIZPL (PRIZGL) – ім'я розділу та управляючої програми. На цьому рівні відбувається опис основних масивів інформації та звернення до гілок завантаження. Економія ресурсів оперативної пам'яті ЕОМ забезпечується використанням оператора CALL LOAD GO фактичним параметром котрого слугує ім'я гілки завантаження.

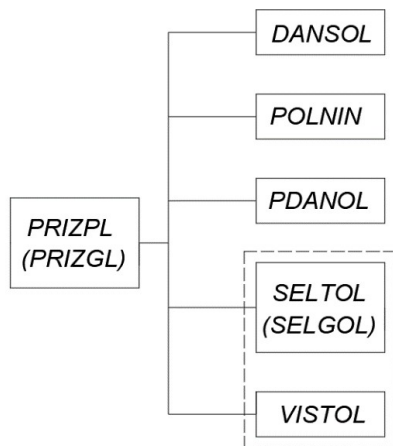


Рис.1. Схема структури обчислюваного комплексу.

Fig.1. Scheme of the structure of the calculated complex.

DANSOL – ім'я управляючої програми гілки завдання та обробки первинної інформації про об'єкт.

Основними вихідними даними є інформаційні масиви (поле координат, поле температур, поле ознак, поле номерів сіткових координат і поле навантажень), розміри сіткової області, параметри кількісного інтегрування (координати точок інтегрування та їх кількість, значення вагових функцій).

Програми гілки DANSOL (рис. 2) формують набір вихідних даних, що відображають топологію об'єкта (TELOT і POLOT), його геометрію (GEOM), умови закріплення (ZAKRES і ZAKREP).

Модуль FUNVES містить інформацію про координати точок інтегрування та обчислює відповідні значення вагових функцій. SETKOS виконує обчислення сіткових координат вузлів дискретної моделі, по якій у модулі NOKOS визначається значення наскрізного номеру вузла. У процесі роботи програми GEOM та SETKOS використовують модулі типу INTERP, INTERL, які дозволяють задавати інформацію зміцненими блоками, межі яких визначені значеннями сіткових координат. Блок DANSOL передбачає також задання параметрів, які характеризують інтенсивність зовнішніх впливів та фізичні властивості матеріалу, параметрів управління організацією крокового процесу та контрольного друку, а також кількості утримуваних членів розкладання і

точність вирішення систем лінійних та нелінійних рівнянь.

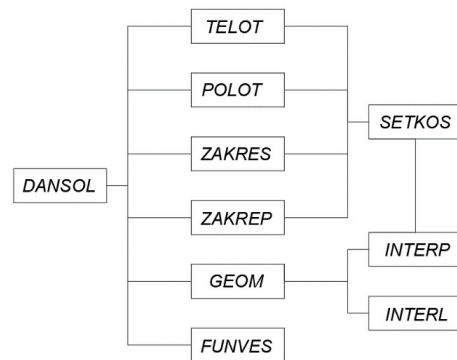


Рис.2. Схема структури програми гілки DANSOL.

Fig.2. Scheme of the program structure of the DANSOL branch.

Підпрограма POLNIL, звернення до якої відбувається після загрузки гілки DANSOL, проводить обчислення значень координатних функцій та їх похідних по Z^3 у точках інтегрування та заповнює відповідні масиви.

PDANOL – ім'я управляючої програми гілки контрольного друку перетворених вихідних даних. Результатом її роботи є таблиця координат вузлів сіткової області, полів ознак, які характеризують умови закріплення і значень координатних функцій та їх похідних. Зовнішнє навантаження може бути задане у вигляді вимушених зміщень окремих точок поверхні (підпрограма MASUL), силових (підпрограма NAGRUI) або температурних впливів (TEMPER). Модуль PDANOL забезпечує контрольний друк відповідних масивів.

Завантаження гілок SELTOL та VISTOL організоване у циклі по крокам навантаження. При вирішенні геометрично нелінійних задач у рамках розділу PRIZGL замість SELTOL відбувається звернення до модуля SELGOL.

SELTOL – ім'я управляючої підпрограми гілки вирішення задачі термопластичності.

SELGOL – ім'я управляючої підпрограми гілки вирішення задачі пластичної формозміни.

Структурна схема гілки вирішення нелінійної задачі представлена на рис. 3.

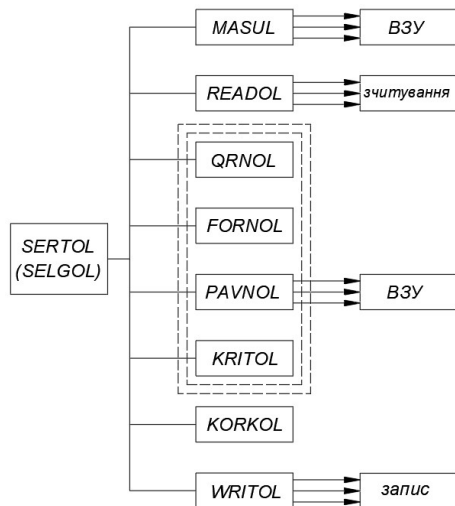


Рис.3. Схема структури програми гілки SERTOL (SELGOL).

Fig.3. Scheme of the program structure of the SERTOL (SELGOL) branch.

Блок MASUL забезпечує можливість задання вимушених зміщень окремих частин конструкції. Звернення до нього відбувається на першій інтеграції. Для геометрично нелінійних задач при реалізації алгоритму x екстраполяцією переміщення, їх значеннями, вирішеними на попередньому кроці програма MASUL працює тільки один раз на першій інтеграції першого кроку. У рамках модуля SERTOL (SELGOL) організовані вкладені цикли по ітераціях і по утримуваним членам розкладання. Виклик програм QRNOL, FORPOL, PAVNOL, KRITOL проводиться із внутрішнього циклу.

Модуль QRNOL забезпечує формування вектору зовнішніх навантажень, обчислення вузлових реакцій та перевірку виконання рівняння рівноваги. Формування та складання діагональних підматриць жорсткості та виконання прямого та зворотнього ходу метода Гауса виконує блок FORPOL. При вирішенні фізично нелінійних задач діагональні підматриці жорсткості формуються тільки на першому кроці по параметру навантаження. Для задач про великі пластичні деформації обчислення компонентів матриці жорсткості відбувається на кожному кроці (або через фіксовану кількість кроків) у перемінній відліковій конфігурації за даними попереднього кроку.

Підпрограма PAVNOL формує на зовнішніх запам'ятовуючих пристроях масиви координатних переміщень та їх похідних шляхом відновлення їх по значенням для кожного члена розкладання. Перевірка умови збіжності ітераційного процесу вирішення систем лінійних та нелінійних рівнянь виконується у підпрограмі KRITOL. Гілка SELGOL передбачає також покроковий перерахунок компонентів масиву координат вузлів вихідної дискретної моделі з врахуванням обчислених значень координатних переміщень, який виконує модуль KORKOL. Звернення до KORKOL відбувається після виходу з ітераційного циклу. Безперервність вирішення задачі кроковим методом забезпечується зберіганням масиву напружень, а для геометрично нелінійних задач масивів напружень та переміщення вузлів, заповнених на попередньому кроці за параметром навантаження, запис яких на ЗЗП виконує програма WRITOL. Модуль READOL зчитує цю інформацію на початку виконання наступного кроку. При виконанні алгоритму екстраполяції переміщення визначення вектору вузлових реакцій у підпрограмі QRNOL на першій ітерації наступного кроку відбувається відповідно до значень переміщень, вирахованих на попередньому кроці.

VISTOL – ім'я управляючої програми гілки обробки та друку результатів розрахунку. Завантаження гілки VISTOL відбувається в кінці виконання кожного кроку або через деяку кількість кроків. У результаті роботи програм блоку VISTOL виконується зчитування масивів переміщень та напружень, що зберігаються на зовнішніх запам'ятовуючих пристроях, перетворення величин напружень, вирахованих у місцевій системі координат до їх значень та видача на друк таблиць вузлових переміщень, напружень у базисній системі координат, інтенсивності дотичних напружень та пластичних напружень.

Вивід інформації таким чином, що на початку кожного кроку друкується його номер, кількість ітерацій на даному кроці та загальна кількість ітерацій, виконаних з початку вирішення задачі.

ВИСНОВКИ

Отже, слід відмітити, що запропонована методика та пакет прикладних програм, що її реалізує, забезпечує високу ефективність НМСЕ порівняно з традиційним методом скінчених елементів при вирішенні систем лінійних та нелінійних рівнянь для виділеного класу об'єктів. Що дозволить в подальшому досліджувати напружено-деформований стан криволінійних неоднорідних призматичних тіл.

ЛІТЕРАТУРА

1. Гуляр А.И. Исследование эффективности различных алгоритмов решения задачи упруго-пластического равновесия / А.И. Гуляр, И.В. Половец // *Сопротивления материалов и теория сооружений*. -1983. Вып.42. – С.81-87.
2. Гуляр А.И. Численное моделирование на основе метода конечных элементов процессов пластического формоизменения тел вращения при наличии сил трения / А.И. Гуляр, И.В. Половец, А.С. Сахаров –*Рукопись деп. В УкрНИИТИ, № 1788 Ук-84 деп.*
3. Баженов В.А. Напряжено-деформованный стан і формозмінення в тілах обертання складної структури / В.А. Баженов, Ю.В. Максим'юк // *Опір матеріалів і теорія споруд* – 2019. – Вип. 102. – С. 3–12.
4. Максим'юк Ю.В. Вихідні співвідношення нелінійного динамічного формозмінення вісесиметричних та плоскодеформованих тіл / Ю.В. Максим'юк, І.І. Солодей, Р.Л. Стригун // *Опір матеріалів і теорія споруд* – 2019. – Вип. 102. – С. 252–262.
5. Максим'юк Ю.В. Індивідуальність тензорів деформацій, напружень та їх припоєнень при умові енергетичної сполученості / Ю.В. Максим'юк // *Опір матеріалів і теорія споруд* – 2017. – Вип. 99. – С. 151–159.
6. Пискунов С. О. Алгоритм розв'язання геометрично нелінійної задачі термов'язкопружнопластичного деформування вісесиметричних тіл / С. О. Пискунов, О. І. Гуляр, Ю. В. Максим'юк // *Опір матеріалів і теорія споруд*. – 2009. – Вип. 83. – С. 25–42.
7. Maksimyyuk Yu.V. Basic relations for physically and geometrically nonlinear problems of deformation of prismatic bodies / Yu.V. Maksimyyuk, S.O. Pyskunov, A.A. Shkril', O.V. Maksimyyuk // *Strength of*

Materials and Theory of Structures: Scientific-&-Technical collected articles – Kyiv: KNUBA, 2020. – Issue 104. – P.70-83.

8. Гуляр О. Розв'язувальні співвідношення моментної схеми скінчених елементів в задачах термов'язкопружнопластичного деформування / О. Гуляр, Ю. Максим'юк, А. Козак, О. Максим'юк // *Будівельні конструкції теорія і практика* – 2020. – Вип. 6. – С. 72–84.
9. Максим'юк Ю. Розв'язувальні співвідношення моментної схеми скінчених елементів в задачах термов'язкопружнопластичного деформування / Ю. Максим'юк, А. Козак, О. Максим'юк // *Будівельні конструкції теорія і практика* – 2019. – Вип. 4. – С. 10–20.
10. Качанов Л.М. Основы теории пластичности. – М.: Физматгиз, 1960. – 456 с.
11. Закономерности ползучести и длительной прочности : справочник / [под ред. Шестерикова С. А.] – М. : Машиностроение, 1983. – 101 с.
12. Качанов Л.М. Теория ползучести. – М.: Физматгиз, 1969. – 420 с.
13. Уилкинс М.Л. Расчет упруго-пластических течений. / М.Л. Уилкинс // *В.кн. Вычислительные методы в гидротехнике*. – М.: Мир, 1987.-С. 212-263.
14. Лурье А. И. Теория упругости/ А. И. Лурье. – М. : Наука, 1970. – 940 с.
15. Лурье А.И. Нелинейная теория упругости/ А. И. Лурье. – М. : Наука, 1980. – 512с.
16. Поздеев А. А. Большие упруго-пластические деформации / А. А. Поздеев, П. В. Трусов, Ю. И. Няшин – М. : Наука, 1986. – 232 с.

REFERENCES

1. Gulyar A.I. Investigation of the effectiveness of various algorithms for solving the problem of elastic-plastic equilibrium / A.I. Gulyar, I.V. Polovets // *Resistances of materials and theory of structures*. -1983. Issue 42. - S.81-87.
2. Gulyar A.I. Numerical modeling on the basis of the finite element method of plastic deformation processes of bodies of revolution in the presence of friction forces. Gulyar, I.V. Polovets, A.S. Sakharov –*Manuscript dep. In UkrNIINTI, No. 1788 UK-84 dep.*
3. Bazhenov V.A. Stress-deforming mill and molding in the folds of folding structure / V.A. Bazhenov, Yu.V. Maksimyyuk // *Opir materials and theory of construction* - 2019. - Vip. 102. - S. 3–12.

4. **Maksimyuk Yu.V.** Evident performance of non-linear dynamic form change of weight-symmetric and flat-deforming types / Yu.V. Maksimyuk, I.I. Solodey, R.L. Strigun // *Opir materials and theory sporud* - 2019. - Vip. 102. - S. 252–262.
5. **Maksimyuk Yu.V.** The indifference of the strain tensors, the stress and the increment in the mind of an energetic well-being / Yu.V. Maksimyuk // *Opir material and theory sporud* - 2017. - Vip. 99. - S. 151-159.
6. **Piskunov S. O.** Algorithm for solving geometrically nonlinear problems of terms of visco-spring-plastic deformation of viscous-metric objects / S. O. Piskunov, O. I. Gulyar, Yu. V. Maksimyuk // *Opir materials and theory of construction*. - 2009. - VIP. 83. - S. 25–42.
7. **Maksimyuk Yu.V.** Basic relations for physical-ly and geometrically nonlinear problems of deformation of prismatic bodies / Yu.V. Maksimyuk, S.O. Pyskunov, A.A. Shkrii ' , O. V. Maksimyuk // *Strength of Materials and Theory of Structures: Scientific - & - Technical collected articles* - Kyiv: KNUBA, 2020. - Issue 104. - P.70-83.
8. **Gulyar O.** Solving relations of the moment scheme of finite elements in problems of thermoviscoelastic de-forming / O. Gulyar, Yu. Maksymyuk, A. Kozak, O. Maksymyuk // *Building constructions. Theory and practice* - 2020 - Vip. 6. - P. 72–84.
9. **Maksimyuk Yu.** Rozv'yazuvalny spivvid-wear moment schemes of skin elements in the problems of thermoviscoplastic de-molding / Yu. Maksimyuk, A. Kozak, O. Maksim'yuk // *Wake-up constructions theory and practice* - 2019. - VIP. 4. - P. 10–20.
10. **Kachanov L.M.** Foundations of the theory of plasticity. - Moscow: Fizmatgiz, 1960. -- 456 p.
11. Regularities of creep and long-term strength: handbook / [ed. **Shesterikova S. A.**] - M.: *Mechanical engineering*, 1983. –101 p.
12. **Kachanov L.M.** Creep theory. - Moscow: *Fizmatgiz*, 1969. -- 420 p.
13. Wilkins M.L. Calculation of elastic-plastic flows. / M.L. Wilkins // *V. kn. Computational methods in hydraulic engineering*. - M.: Mir, 1987.- S. 212-263.
14. **Lurie A. I.** Theory of elasticity / A. I. Lurie. - M.: Nauka, 1970. -- 940 p.
15. **Lurie A.I.** Nonlinear theory of elasticity / AI Lurie. - M.: Nauka, 1980. -- 512p.
16. **Pozdeev A. A.** Large elastic-plastic deformations / A. A. Pozdeev, P. V. Trusov, Yu. I. Nyashin - M.: Nauka, 1986. - 232 p.

Algorithm for solving a system of linear and nonlinear equations by the semianalytic finite element method for curvilinear inhomogeneous prismatic bodies

*Yurii Maksymiuk, Maryna Goncharenko,
Ivan Martyniuk, Oleksandr Maksymiuk*

Summary. The algorithm of the method of block iterations for solving linear and nonlinear equations by the semianalytic finite element method for curvilinear inhomogeneous prismatic bodies is implemented.

The matrix of the system of solving equations of the semianalytic finite element method when considering inhomogeneous prismatic bodies, regardless of the choice of the coordinate function system, is completely filled and consists of blocks, each of which has a tape structure. The solution of systems with a matrix of this type is most rationally carried out by the method of block iterations. Since the developed approach is focused on the consideration of elastic and elastic-plastic deformation processes, the solution of systems of linear and nonlinear equations is performed using a single algorithm, which is a combination of stepwise integration method and block iteration method parameter.

When considering physically nonlinear problems, the stiffness matrix is formed with the assumption of elastic work of the material. The calculation of the elements of the stiffness matrix for geometrically nonlinear problems is performed according to the same formulas, but all the values included in them are defined in a variable reference configuration at each step of the parameter.

A method for solving physically and geometrically nonlinear problems for massive and thin-walled inhomogeneous curvilinear prismatic objects presented in the form of a set of applications, which are implemented in the Research Institute of Structural Mechanics of Kyiv National University of Construction and Architecture, focused on personal electronic computers MS WINDOWS system. The set of applications is written in high-level algorithmic languages FORTRAN Power Station and C.

Keywords. Finite element method (FEM); semi-analytic finite element method (SFEM); linear and nonlinear equations; curvilinear inhomogeneous prismatic bodies; block iteration method (BLI); complex of application programs (CAP).