

## РЕАЛІЗАЦІЯ ПРОГРАМНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ РОЗРАХУНКУ МІЦНОСТІ НА ОСНОВІ НАПІВАНАЛІТИЧНОГО МЕТОДУ СКІНЧЕНИХ ЕЛЕМЕНТІВ

*Іван МАРТИНЮК*

Київський національний університет будівництва і архітектури  
31, просп. Повітрофлотський, Київ, Україна, 03037  
ivan.martinyuk@gmail.com, <http://orcid.org/0000-0001-7957-2068>

**Анотація.** Одним з головних і відповідальних етапів створення апарату чисельного аналізу конструкцій методом скінчених елементів є його реалізація у вигляді комплексу програм. Принципи побудови комплексу мають враховувати сучасні вимоги, що виставляються до програмного забезпечення розрахунку міцності в сучасних розрахункових комплексах. До їх числа в першу чергу відноситься автоматизація основних етапів обчислювального процесу, раціональне використання ресурсів операційної та зовнішньої пам'яті запам'ятовуючих пристроїв, не замкнутість у відношенні до класів задач, що вирішуються, алгоритми завдання вхідних даних, методом дискретизації та вирішення систем рівнянь і т.д. Крім того структура програм повинні враховувати специфіку напіваналітичного методу скінчених елементів, для якого ще не накопичений такий великий досвід створення розвинутих систем математичного забезпечення вишукувань просторових конструкцій, як при використанні традиційного варіанту МСЕ. Значний досвід скінченоелементного розв'язання задач механіки, накопичений впродовж останніх десятиріч, знайшов відображення у низці промислових комерційних програмних комплексів, вітчизняного (ЛІРА, SCAD) та іноземного (ANSYS, Nastran, ABAQUS) виробництва. Розвинена скінченноелементна база цих програмних комплексів дозволяє отримувати розв'язки широкого кола задач механіки деформівного твердого тіла для об'єктів різної вимірності, в тому числі для масивних просторових тіл, а зручні засоби введення-виведення інформації і обробки отриманих результатів роблять їх вельми доступними для ши-



**Іван МАРТИНЮК**  
докторант кафедри будівельної механіки,  
к.т.н.

рокого кола користувачів та дозволяють з максимальним ступенем наочності відображати отримані результати. Також існують об'єктно орієнтовані комплекси, які створені на виробничих підприємствах та науково-дослідних інститутах наприклад в Інституті проблем міцності НАН України, у Дніпропетровському національному університеті.

Проведений дослідження визначить найбільш оптимальні з точки зору обчислювальних витрат і складності реалізації шляхи розв'язання перелічених задач, а також окреслить коло нерозв'язаних питань.

**Ключові слова.** Метод скінчених елементів (МСЕ); напіваналітичний метод скінчених елементів (НМСЕ); ряди Фур'є; масивні, тонкостінні призматичні тіла; вектор вузлових реакцій; коефіцієнти матриці жорсткості.

### ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМИ

Значне число досліджень, пов'язаних з розробкою і застосуванням НМСЕ [3-5, 7, 9-11, 24,], як правило, використовуються співвідношення тонких оболонки [12].

Розглянуті різні задачі, пов'язані з урахуванням розгалужених і складових систем [13-15, 25], визначенням напружено-деформованого стану оболонок змінної товщини при термосилового навантаження [16, 20, 23].

В роботах, що відображають застосування напіваналітичного методу скінченних елементів до розрахунку тіл обертання [1, 2, 6, 8, 17-19, 21, 22], використана ціла бібліотека СЕ яка складається з базових і спеціальних скінченні елементи.

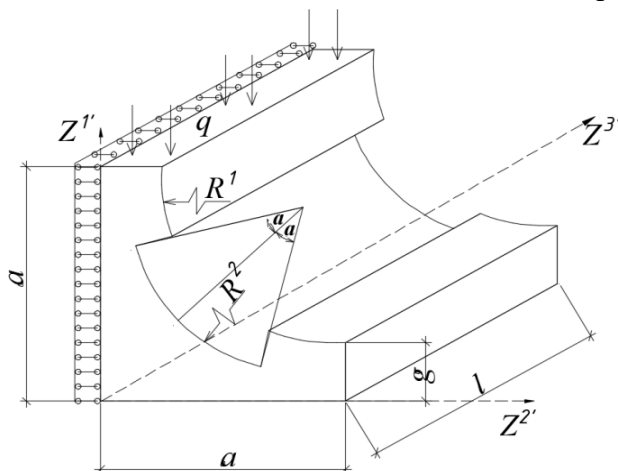
### ЗАДАННЯ, ОБРОБКА І ДРУК ВХІДНОЇ ТА ВИХІДНОЇ ІНФОРМАЦІЇ

Для розрахунку конкретної конструкції необхідно задати вихідні дані, що відображають її топологію, геометрію, умови закріплення, зовнішній вплив, фізичні властивості матері-

алу, а також параметри, що управляються організацією крокового процесу навантаження, точністю вирішення системи лінійних та нелінійних рівнянь, організацією контрольного друку, видачею проміжних та скінченних результатів.

Основні вимоги, що пред'являються до вхідної та вихідної інформації, припускають мінімум її об'єму при повноті змісту. Проте використання вхідної інформації початкового вигляду призводить до збільшення часу розрахунку, тому в комплексі прийнятий ще один вид інформації – оперативний, що використовується в процесі вирішення задачі.

В розрахунковому комплексі за основу прийняті регулярні топологічні структури, метод опису інформації оперативного рівня яких розглянемо на прикладі конструкцій, що зображені на рис. 1.

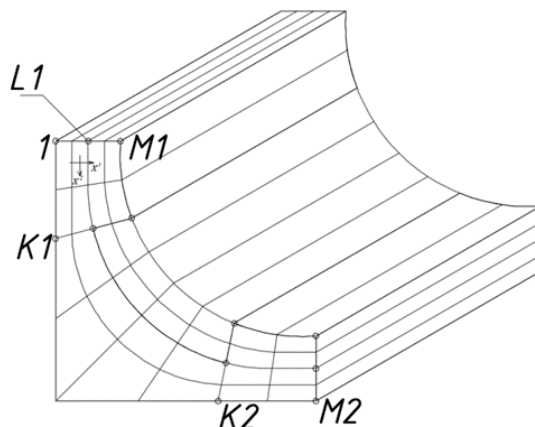


$$\frac{V_{3i}(Z^3 = 0) = 0}{U_{i1}(Z^3 = 1) = 0}$$

**Рис. 1.** Розрахункова схема конструкції  
**Fig. 1.** Calculation diagram of the structure

Відмінна особливість НМСЕ полягає в тому, що у напрямку  $x^3$  конструкція апроксимується одним призматичним кінцевим елементом. Завдяки цьому суттєво скорочується об'єм інформації, яка, за виключенням даних про зовнішні впливи, відповідає двомірним задачам. Розрахункову модель представимо набором призматичних скінченних елементів, що створені за допомогою координатних ліній  $x^\alpha$  (рис. 2).

Прийнявши точку відліку в лівому верхньому куту конструкції, вводимо нумерацію вузлів сіткової області відповідно вздовж першої криволінійної координати  $x^1$  від  $I$  до  $M1$  та вздовж другої координати  $x^2$  від  $I$  до  $M2$ . Напрямок осей  $x^\alpha$  обирається так, щоб при повороті вони могли співпасти по напрямку з осями



**Рис. 2.** Розрахункову модель, що представлена набором призматичних кінцевих елементів  
**Fig. 2.** The calculation model, represented by a set of prismatic finite elements

базисної системи  $z^{\beta'}$ . Крім того має виконуватись умова:

$$M1 = M2 \quad (1)$$

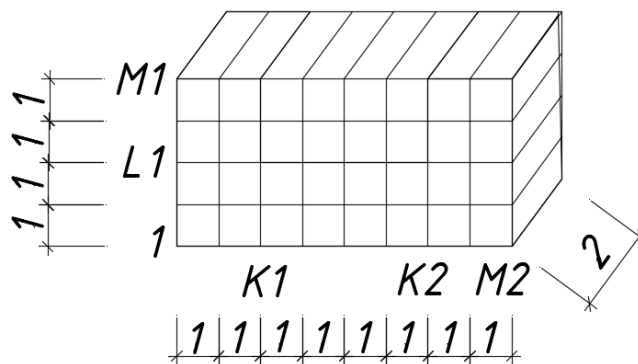
так як в цьому випадку при однаковій кількості невідомих буде мінімальна ширина стрічки матриці. Сукупність чисел, що визначають номер будь-якого вузла об'єкту вздовж кожного напрямку, утворює систему сіткових координат. В системі сіткових координат область поперечного перерізу об'єкта тотожна до прямокутника, який складений з

регулярного набору квадратів одиничного розміру (рис. 2).

Нехай  $HMS = M1 \cdot M2$  – загальна кількість вузлів сіткової області. Введемо у розгляд наскрізну нумерацію вузлів від  $I$  до  $HMS$  в такому порядку, щоб номер  $N$  вузла з сітковими координатами  $I, J$  був рівний

$$N(I, J) = I + M1 \cdot (J - 1) \quad (2)$$

де  $I$  – сіткова координата вузла  $N$  вздовж осі;  $x^1$ ,  
 $J$  – сіткова координата вузла  $N$  вздовж осі.



**Рис. 3.** Загальний вигляд поперечного перерізу в системі сіткових координат  
**Fig. 3.** General view of the cross section in the grid coordinate system

Будемо вважати номером  $SE$  мінімальний номер однієї з чотирьох вершин сіткового квадрату, орієнтованого в місцевій системі

координат. Параметри  $S_1$  та  $S_2$  можливо умовно назвати відносними координатами вершин елемента. Значення наскрізних номерів

$NU$  вузлів сіткової області, що співпадають з вершинами  $N$ -го квадрату, виражаються через відносні координати  $S_1$  та  $S_2$  і номер  $N$  формулою:

$$NU = \frac{1 + S_1}{2} + M1 \frac{1 + S_1}{2} + N \quad (3)$$

Параметри сіткової області  $M1$ ,  $M2$ ,  $HMS$  та блок, що реалізує обчислення наскрізних номерів вузлів по параметру  $N$  та формулі (3), визначають оперативний рівень інформації (рис. 3), що характеризує впорядкованість розглянутої топологічної структури.

Оперативна інформація про наявність «пустих» елементів, що утворюють порожнини та вирізи, кодується в масиві  $F(HMS)$ . Вузлам з сітковими координатами  $I=M1$  та  $J=M2$  також відповідають «пусті» елементи.

Жорсткі зв'язки накладаються у напрямку, що співпадає з координатними вісями системи  $z^{\beta'}$ , та можуть перешкоджати переміщенням вузлів сіткової області по всій довжині призматичного тіла або тільки в торцях. В першому випадку оперативна інформація

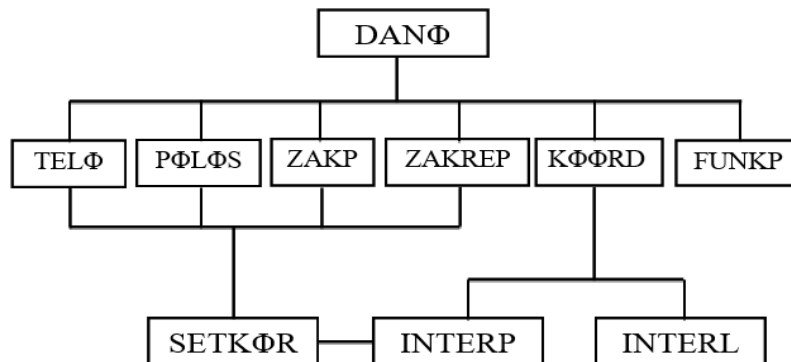
кодується в масиві  $F(HMS)$ , у другому – в масиві  $FT(HMS)$ .

Геометричні дані оперативного рівня, що відображають особливості форми об'єкту в перерізі  $Z(2, HMS)$ . В перемінних  $Z(K, N)$  поля координат перший індекс приймає значення 1, 2 та відповідає напрямку координатної осі, другий - наскрізному номеру вузла сіткової області.

Оперативна інформація про значення координатних функцій та їх похідних по осі  $x^3$ , що обчислюються в точках інтегрування, формується в масивах  $FI(K, L)$  та  $FI3(K, L)$  відповідно. Індекс  $K$  змінюється від  $I$  до  $NUL$ ,  $L$  - від  $I$  до  $KZZ$ , де  $NUL$  – число членів, що утримуються від розкладання,  $KZZ$  – кількість точок інтегрування. Координати точок інтегрування заносять до масиву  $Z3(KZZ)$ .

Оперативні дані, що використовуються підпрограмою обчислення компонент тензора пружних сталей, визначаються за формулою:

$$G1 = \frac{E}{1 + \nu}; G2 = \frac{\nu}{1 - 2\nu} \quad (4)$$



**Рис. 4.** Функціональна схема підпрограми DANΦ  
**Fig. 4.** Functional diagram of the DANΦ subprogram

Формування топологічної частини кодів масиву відповідно до вхідних даних здійснюють підпрограми (рис. 4)

$TEL\Phi(I1, J1, I2, J2, F, HMS)$

$P\Phi L\Phi S(I1, J1, I2, J2, F, HMS)$

Підпрограма  $TEL\Phi$  для вузлів  $N(I, J)$  з сітковими координатами, що задовольняють умову:

$$I1 \leq I \leq I2, J1 \leq J \leq J2 \quad (5)$$

посилає в чарунку масиву  $F(N)$  число 71, а в чарунки, сіткові координати яких  $I = I1$  або  $J = J2$  – число 7.

Підпрограма PFLΦS здійснює в масиві F наступні зміни:

$$F(N) = F(N) - 71, (I1 \leq I \leq I2, J1 \leq J \leq J2)$$

$$F(N) = F(N) - 64, (I = I1, J = J1)$$

Якщо у вузлі  $N(I, J)$  сходяться тільки «пусті» кінцеві елементи, то у чарунку масиву  $F(N)$  посилається нуль.

## ВИСНОВКИ

Таким чином, на підставі проведених досліджень можна зробити висновок, що завдання вихідних даних та перетворення цих даних в масиви оперативної інформації виконує гілка програм DANΦ за допомогою операторів присвоювання чи в декларативній частині за допомогою операторів DATA.

## ЛІТЕРАТУРА

1. Гуляр О.І. Алгоритм розв'язання вісесиметричних задач нестационарної теплопровідності / О.І. Гуляр, С.О. Пискунов, Ю.В. Максим'юк [та ін.] // *Опір матеріалів і теорія споруд*. – 2015. – Вип. 95. – С. 11–20.
2. Андрієвський В.П. Методика розв'язання вісесиметричних задач стаціонарної теплопровідності та термопружності на основі МССЕ / В.П. Андрієвський, Ю.В. Максим'юк // *Опір матеріалів і теорія споруд*. – 2014. – Вип. 93. – С. 64–72.
3. Баженов В.А. Алгоритм розв'язання просторової задачі термов'язко-пружнопластичності призматичних тіл з урахуванням пошкодженості / Баженов В.А., Гуляр О.І., Пискунов С.О., Андрієвський В.П. // *Опір матеріалів і теорія споруд*, № 78, 2006. – С.3-17.
4. Баженов В.А. Дослідження континуального, дискретного та дисперсного руйнування просторових тіл на основі напіваналітичного методу скінченних елементів / Баженов В.А., Гуляр О.І., Пискунов С.О., Сахаров О.С., Ільченко О.М, Рутковський В.А. // *"Опір матеріалів і теорія споруд"*, 2002. – №70. – С.3-32.
5. Баженов В.А. Ефективність розв'язання просторових задач теорії повзучості / Баженов В.А., Гуляр О.І., Пискунов С.О., Рутковський

- В.А. // *Опір матеріалів і теорія споруд* № 74, 2004 С.3–13.
6. Баженов В.А. Напружено-деформований 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.
  7. Баженов В.А. Решение пространственных задач термовязкопластичности на основе ПМКЭ / Баженов В.А., Гуляр А.И., Пискунов С.О., Андриевский В.П. // *Прикладная механика*, 2009. – С.60-75.
  8. Баженов В.А. Розрахункові співвідношення НМСЕ просторової задачі термов'язко-пружнопластичності для неоднорідних тіл обертання / Баженов В.А., Гуляр О.І., Пискунов С.О., Остапенко Р.М // *Опір матеріалів і теорія споруд* № 82, 2008. – С.3-29.
  9. Баженов В.А. Чисельне моделювання нелінійного деформування, континуального і дискретного руйнування методом скінченних елементів /Баженов В.А., Гуляр О.І., Пискунов С.О., Сахаров О.С. // *"Технологические системы"* №2(13) 2002. –С.30-33.
  - 10.Баженов В. А. Напіваналітичний метод скінчених елементів в задачах руйнування просторових тіл: Монографія /В.А. Баженов, О.І. Гуляр, С.О. Пискунов, О.С. Сахаров – К. : КНУБА, 2005. – 298 с.
  - 11.Баженов В. А. Напіваналітичний метод скінчених елементів в задачах континуального руйнування просторових тіл: Монографія /В.А. Баженов, О.І. Гуляр, С.О. Пискунов, О.С. Сахаров – К. : «Каравела», 2014. – 236 с.
  - 12.Баженов В. А. Нелінійне деформування та стійкість пружних оболонок неоднорідної структури / В. А. Баженов, О. П. Кривенко, М. О. Соловей.– К. : ЗАТ «Віпол», 2010. – 315 с.
  - 13.Гуляр О. Універсальний призматичний скінчений елемент загального типу для фізично і геометрично нелінійних задач деформування призматичних тіл / О. Гуляр, Ю. Максим'юк, А. Козак, О. Максим'юк // *Будівельні конструкції теорія і практика* – 2020. – Вип. 6. – С. 72–84.
  - 14.Іванченко Г.М. Побудова розв'язувальних рівнянь напіваналітичного методу скінченних елементів для призматичних тіл складної форми / Г.М. Іванченко, Ю.В. Максим'юк,

- А.А. Козак, І.Ю. Мартинюк // *Управління розвитком складних систем: Наук.-техн. збірн. – К.: КНУБА, 2021 – Вип.46 – С. 55-62.*
15. **Максим'юк Ю.** Особливості виведення формул для обчислення вузлових реакцій і коефіцієнтів матриці жорсткості скінченого елемента з усередненими механічними і геометричними параметрами / Ю. Максим'юк, А. Козак, І. Мартинюк, О. Максим'юк // *Будівельні конструкції теорія і практика. – 2021. – Вип. 8. – С. 97–108.*
  16. **Максим'юк Ю.** Розв'язувальні співвідношення моментної схеми скінчених елементів в задачах термов'язко-пружнопластичного деформування / Ю. Максим'юк, А. Козак, О. Максим'юк // *Будівельні конструкції теорія і практика – 2019. – Вип. 4. – С. 10–20.*
  17. **Максим'юк Ю.В.** Алгоритм розв'язку задач нелінійного деформування та стійкості пружнопластичних вісесиметричних оболонок середньої товщини / Ю.В Максим'юк // *Опір матеріалів і теорія споруд – 2014. – Вип. 92. – С. 148–156.*
  18. **Максим'юк Ю.В.** Розрахункові співвідношення універсального скінченого елемента на основі моментної схеми скінчених елементів / Ю.В Максим'юк // *Опір матеріалів і теорія споруд – 2015. – Вип. 94. – С. 244–251.*
  19. **Максим'юк Ю.В.** Скінчений елемент загального типу для розв'язку вісесиметричної задачі нестационарної теплопровідності / Ю.В Максим'юк // *Опір матеріалів і теорія споруд – 2016. – Вип. 96. – С. 148–157.*
  20. **Баженов В.А.** Метод скінчених елементів у задачах деформування та руйнування тіл обертання при термосиловому навантаженні / [Баженов В.А., Пискунов С.О., Максим'юк Ю.В.] – *Київ: Вид-во “Каравела”, 2018. – 316с.*
  21. **Пискунов С.О.** Особливості використання моментної схеми скінчених елементів (МССЕ) при лінійних розрахунках оболонок і пластин / С.О. Пискунов, І.І. Солодей, Ю.В Максим'юк, А.Д. Солоденко // *Опір матеріалів і теорія споруд. – 2013. – Вип. 91. – С. 59–75.*
  22. **Баженов В.А.** Особливості використання моментної схеми скінчених елементів (МССЕ) при нелінійних розрахунках оболонок і пластин / В.А. Баженов, О.С. Сахаров, О.І. Гуляр [та ін.] // *Опір матеріалів і теорія споруд. – 2014. – Вип. 92. – С. 3–16.*
  23. **Пискунов С.О.** Визначення напружено-деформованого стану тіл обертання із використанням кругового скінченого елемента змінної площі поперечного перерізу / Пискунов С.О., Мицюк С.В., Шкриль О.О. // *Геотехническая механика. – Днепропетровск, 2007. – Вып. 71. – С. 198-203.*
  24. **Пискунов С.О.** Призматичний скінчений елемент змінної геометрії / Пискунов С.О., Рутковский В.А., Шкриль О.О. // *Опір матеріалів і теорія споруд. Наук.- техн. збірник – К.: КНУБА, 2005.- Вип.. 76, 2005. – С.83–90.*
  25. **Maksimyuk Yu.V.** Basic relations for physically and geometrically nonlinear problems of deformation of prismatic bodies/ Yu.V. Maksimyuk, S.O. Pyskunov, A.A. Shkril', O.V. Maksimyuk // *Опір матеріалів і теорія споруд– 2020. – Вип. 104. – С. 255–264.*

## REFERENCES

1. **Pyskunov O.I.** Alhorytm rozv'iazannia visesymetrychnykh zadach nestatsionarnoi teploprovodnosti / Pyskunov O.I. Huliar, S.O. Pyskunov, Yu.V. Maksymiuk [ta in.] // *Opir materialiv i teoriia sporud. – 2015. – Vyp. 95. – S. 11–20.*
2. **Andriievskiy V.P.** Metodyka rozv'iazannia visesymetrychnykh zadach statsionarnoi teploprovodnosti ta termopruzhnosti na osnovi MSSE / V.P. Andriievskiy, Yu.V Maksymiuk // *Opir materialiv i teoriia sporud. – 2014. – Vyp. 93. – S. 64–72.*
3. **Bazhenov V.A.** Alhorytm rozv'iazannia prostоровoi zadachi termov'язко-pruzhnoplastychnosti pryzmatychnykh til z urakhuvanniam poshkodzhenosti / Bazhenov V.A., Huliar O.I., Pyskunov S.O., Andriievskiy V.P. // *Opir materialiv i teoriia sporud, № 78, 2006. – S.3-17.*
4. **Bazhenov V.A.** Doslidzhennia kontynualnoho, dyskretnoho ta dyspersnoho ruivuvannia prostоровykh til na osnovi napivanalitichnoho metodu skinchennykh elementiv / Bazhenov V.A., Huliar O.I., Pyskunov S.O., Sakharov O.S., Ilchenko O.M, Rutkovskiy V.A. // *"Opir materialiv i teoriia sporud", 2002. – №70. – S.3-32.*
5. **Bazhenov V.A.** Efektyvnist rozv'iazannia prostоровykh zadach teorii povzuchosti / Bazhenov V.A., Huliar O.I., Pyskunov S.O.,

- Rutkovskiy V.A. // *Opir materialiv i teoriia sporud* № 74, 2004 S.3–13.
6. **Bazhenov V.A.** Napruzhenno-deformovanyi stan i formozminennia v tilakh obertannia skladnoi struktury / V.A. Bazhenov, Yu.V Maksymiuk // *Opir materialiv i teoriia sporud* – 2019. – Vyp. 102. – S. 3–12.
  7. **Bazhenov V.A.** Reshenye prostranstvennykh zadach termoviazkoplachynosti na osnove PMKЭ / Bazhenov V.A., Huliar A.Y., Pyskunov S.O., Andryevskiy V.P. // *Prykladnaia mekhanika*, 2009. – S.60-75.
  8. **Bazhenov V.A.** Rozrakhunkovi spivvidnoshennia NMSE prostorovoi zadachi termoviazkopruchnoplachynosti dlia neodnorodnykh til obertannia / Bazhenov V.A., Huliar O.I., Pyskunov S.O., Ostapenko R.M // *Opir materialiv i teoriia sporud* № 82, 2008. – S.3-29.
  9. **Bazhenov V.A.** Chyselne modeliuvannia neliniinoho deformuvannia, kontynualnoho i dyskretnoho ruinuvannia metodom skinchennykh elementiv /Bazhenov V.A., Huliar O.I., Pyskunov S.O., Sakharov O.S. // "Tekhnolohycheskye systemy" №2(13) 2002. –S.30-33.
  10. **Bazhenov V. A.** Napivanalitichnyi metod skinchennykh elementiv v zadachakh ruinuvannia prostorovykh til: Monohrafiia /V.A. Bazhenov, O.I. Huliar, S.O. Pyskunov, O.S. Sakharov – K. : KNUBA, 2005. – 298 s.
  11. **Bazhenov V. A.** Napivanalitichnyi metod skinchennykh elementiv v zadachakh kontynualnoho ruinuvannia prostorovykh til: Monohrafiia /V.A. Bazhenov, O.I. Huliar, S.O. Pyskunov, O.S. Sakharov – K. : «Karavela», 2014. – 236 s.
  12. **Bazhenov V. A.** Neliniine deformuvannia ta stiikist pruzhnykh obolonok neodnorodnoi struktury / V. A. Bazhenov, O. P. Kryvenko, M. O. Solovei.– K. : ZAT «Vipol», 2010. – 315 s.
  13. **Huliar O.** Universalnyi pryzmatychnyi skinchenyi element zahalnoho typu dlia fizychno i heometrychno neliniinykh zadach deformuvannia pryzmatychnykh til / O. Huliar, Yu. Maksymiuk, A. Kozak, O. Maksymiuk // *Budivelni konstruktsii teoriia i praktyka* – 2020. – Vyp. 6. – S. 72–84.
  14. **Ivanchenko H.M.** Pobudova rozviazualnykh rivnian napivanalitichnoho metodu skinchennykh elementiv dlia pryzmatychnykh til skladnoi formy / H.M. Ivanchenko, Yu.V. Maksymiuk, A.A. Kozak, I.Iu. Martyniuk // *Upravlinnia rozvytkom skladnykh system: Nauk.-tehn. zbirn. – K.: KNUBA, 2021 – Vyp.46 – S. 55-62.*
  15. **Maksymiuk Yu.** Osoblyvosti vyvedennia formul dlia obchyslennia vuzlovykh reaktsii i koefitsientiv matrytsi zhorstkosti skinchenoho elementa z userednenymy mekhanichnymy i heometrychnymy parametramy / Yu. Maksymiuk, A. Kozak, I. Martyniuk, O. Maksymiuk // *Budivelni konstruktsii teoriia i praktyka*. – 2021. – Vyp. 8. – S. 97–108.
  16. **Maksymiuk Yu.** Rozviazualni spivvidnoshennia momentnoi skhemy skinchennykh elementiv v zadachakh termoviazkopruchnoplachynoho deformuvannia /Yu. Maksymiuk, A. Kozak, O. Maksymiuk // *Budivelni konstruktsii teoriia i praktyka* – 2019. – Vyp. 4. – S. 10–20.
  17. **Maksymiuk Yu.V.** Alhorytm rozviazku zadach neliniinoho deformuvannia ta stiikosti pruzhnoplastychnykh visesymetrychnykh obolonok serednoi tovshchyny / Yu.V Maksymiuk // *Opir materialiv i teoriia sporud* – 2014. – Vyp. 92. – S. 148–156.
  18. **Maksymiuk Yu.V.** Rozrakhunkovi spivvidnoshennia universalnoho skinchenoho elementa na osnovi momentnoi skhemy skinchennykh elementiv / Yu.V Maksymiuk // *Opir materialiv i teoriia sporud* – 2015. – Vyp. 94. – S. 244–251.
  19. **Maksymiuk Yu.V.** Skinchenyi element zahalnoho typu dlia rozviazku visesymetrychnoi zadachi nestatsionarnoi teploprovodnosti / Yu.V Maksymiuk // *Opir materialiv i teoriia sporud* – 2016. – Vyp. 96. – S. 148–157.
  20. **Bazhenov V.A.** Metod skinchennykh elementiv u zadachakh deformuvannia ta ruinuvannia til obertannia pry termosylovomu navantazhenni / [Bazhenov V.A., Pyskunov S.O., Maksymiuk Yu.V.] – Kyiv: Vyd-vo "Karavela", 2018. – 316s.
  21. **Pyskunov S.O.** Osoblyvosti vykorystannia momentnoi skhemy skinchennykh elementiv (MSSE) pry liniinykh rozrakhunkakh obolonok i plastyn / S.O. Pyskunov, I.I. Solodei, Yu.V Maksymiuk, A.D. Solodenko // *Opir materialiv i teoriia sporud*. – 2013. – Vyp. 91. – S. 59–75.
  22. **Bazhenov V.A** Osoblyvosti vykorystannia momentnoi skhemy skinchennykh elementiv (MSSE) pry neliniinykh rozrakhunkakh obolonok i plastyn / V.A. Bazhenov, O.S. Sakharov, O.I. Huliar [ta in.] // *Opir materialiv i teoriia sporud*. – 2014. – Vyp. 92. – S. 3–16.

23. **Pyskunov S.O.** Vyznachennia napruzhenodeformovanoho stanu til obertannia iz vykorystanniam kruhovoho skinchenoho elementa zminnoi ploshchi poperechnoho pererizu / Pyskunov S.O., Mytsiuk S.V., Shkryl O.O. // *Heotekhnicheskaia mekhanyka.* – Dnepropetrovsk, 2007. – Vyp. 71. – S. 198-203.
24. **Pyskunov S.O.** Pryzmatychnyi skinchenyi element zminnoi heometrii / Pyskunov S.O., Rutkovskiy V.A., Shkryl O.O. // *Opir materialiv i teorii sporud.* Nauk.- tekhn. zbirnyk – K.: *KNUBA*, 2005.- Vyp. 76, 2005. – S.83–90. *Rozghaluzhennia.*
25. **Maksymyuk Yu.V.** Basic relations for physically and geometrically nonlinear problems of deformation of prismatic bodies/ Yu.V. Maksymyuk, S.O. Pyskunov, A.A. Shkryl, O.V. Maksymyuk // *Opir materialiv i teorii sporud–2020.* – Vyp. 104. – S. 255–264.

## IMPLEMENTATION OF STRENGTH CALCULATION SOFTWARE BASED ON THE SEMI-ANALYTICAL METHOD OF FINITE ELEMENTS

*Ivan MARTYNIUK*

**Summary.** One of the main and responsible stages of creating an apparatus for numerical analysis of structures using the finite element method is its implementation in the form of a set of programs. The principles of complex construction should take into account modern requirements for strength calculation software in modern calculation complexes. Among them, first of all, automation of the main stages of the computing process, rational use of the resources of the operating and external memory of storage devices, non-closedness in relation to the classes of

problems to be solved, algorithms for the task of input data, the method of discretization and solution of systems of equations and etc. In addition, the structure of the programs should take into account the specifics of the semi-analytical method of finite elements, for which such a large experience of creating developed systems of mathematical support for the search of spatial structures has not yet been accumulated, as when using the traditional version of FEM. Considerable experience in solving finite element mechanics problems, accumulated over the past decades, has been reflected in a number of industrial commercial software complexes of domestic (LIRA, SCAD) and foreign (ANSYS, Nastran, ABAQUS) production. The developed finite element base of these software complexes allows you to obtain solutions to a wide range of problems of the mechanics of a deformable rigid body for objects of different dimensions, including for massive spatial bodies, and convenient means of input-output of information and processing of the obtained results make them very accessible to a wide circles of users and allow to display the obtained results with the maximum degree of visibility. There are also object-oriented complexes created at manufacturing enterprises and research institutes, for example at the Institute of Strength Problems of the National Academy of Sciences of Ukraine, at the Dnipropetrovsk National University.

The conducted research will determine the most optimal ways of solving the listed problems from the point of view of computing costs and complexity of implementation, as well as outline the circle of unsolved issues.

**Keywords.** Finite element method (FEM); semi-analytic finite element method (SFEM); fourier series; massive; thin-walled prismatic bodies; vector of nodal reactions; coefficients of the stiffness matrix.

*Стаття надійшла до редакції 3.11.22*