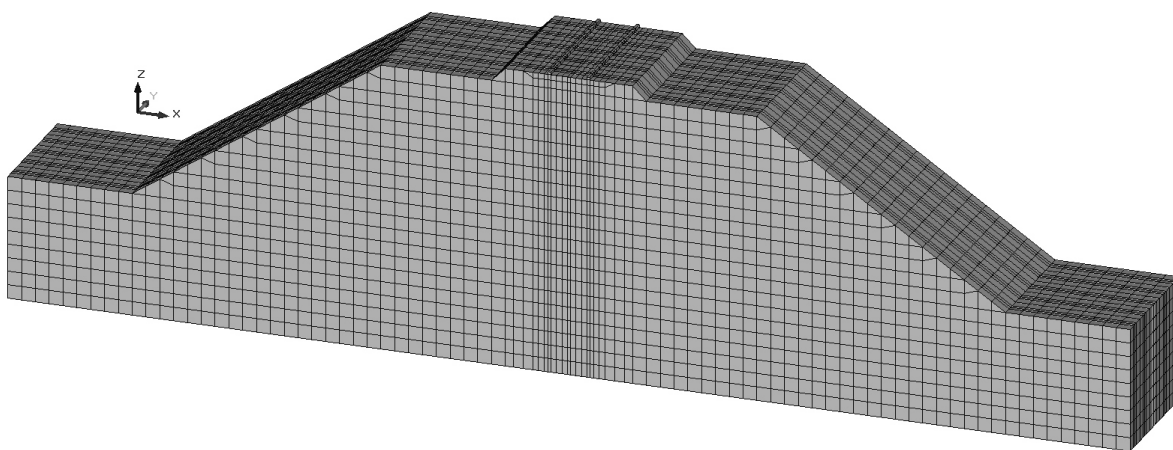


Петренко В.Д., Тютюкін О.Л.,
Кулаженко Є.Ю., Кулаженко О.М.

**МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ
ЗЕМЛЯНОГО ПОЛОТНА ЗАЛІЗНИЦЬ
НА ОСНОВІ МЕТОДУ
СКІНЧЕННИХ ЕЛЕМЕНТІВ**

Навчальний посібник



2016

Петренко В.Д., Тютькін О.Л.,
Кулаженко Є.Ю., Кулаженко О.М.

**МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ
ЗЕМЛЯНОГО ПОЛОТНА ЗАЛІЗНИЦЬ
НА ОСНОВІ МЕТОДУ
СКІНЧЕННИХ ЕЛЕМЕНТІВ**

Навчальний посібник

Дніпро

2016

УДК 624:622.131

П 27

Рецензенти:

д-р техн. наук, доц. *М. Б. Курган*

(ДВНЗ «Дніпропетровський національний університет
залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна», м. Дніпро)

д-р техн. наук, проф. *С. М. Гапєєв*

(ДВНЗ «Національний гірничий університет», м. Дніпро)

*Рекомендовано Вченою радою Дніпропетровського національного
університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна
(Протокол №4 від «28» листопада 2016 р.)*

Петренко, В. Д.

П 27 Математичне моделювання земляного полотна залізниць на основі
методу скінченних елементів: навчальний посібник / Петренко В.Д.,
Тютькін О.Л., Кулаженко Є.Ю., Кулаженко О.М. – Дніпро : Вид-во
ДНУЗТу, 2016. – 64 с.

ISBN 978-966-8471-76-6

Посібник розроблено для вивчення напружено-деформованого стану земляного полотна залізниці шляхом математичного моделювання на основі методу скінченних елементів. У ньому наведено як загальні відомості про метод та професійний розрахунковий комплекс SCAD, так і практичні рекомендації щодо створення адекватних реальним умовам експлуатації скінченно-елементних моделей земляного полотна.

Посібник складено відповідно до календарного плану практичних занять дисципліни «Математичні методи моделювання взаємодії в системі "кріплення – масив"» для магістрів вищих навчальних закладів, які навчаються за спеціальністю 192 «Будівництво та цивільна інженерія».

Іл. 44. Табл. 3. Бібліогр.: 21 назв.

© Петренко В. Д.,
Тютькін О. Л.,
Кулаженко Є.Ю.,
Кулаженко О.М.,
2016

ISBN 978-966-8471-76-6

ЗМІСТ

Стор

Вступ	
Розділ 1. Теоретичні основи методу скінченних елементів	
Розділ 2. Загальні відомості про проектно-обчислювальний комплекс SCAD.....	
Розділ 3. Практичні навички моделювання земляного полотна у ПОК SCAD.....	
3.1. Відомості про роботу з основними модулями ПОК SCAD ...	
3.2. Основні операції зі створення моделі земляного полотна	
3.3. Основні операції з вузлами та елементами	
3.4. Визначення властивостей вузлів та елементів	
3.5. Задання схем завантаження	
3.6. Управління розрахунком	
3.7. Аналіз результатів	
Розділ 4. Математичне моделювання земляного полотна у програмному комплексі SCAD	
Список літератури.....	
Додаток.....	

ВСТУП

На сьогоднішній час залізничний транспорт в єдиній транспортній системі України виконує провідну роль по забезпеченню потреб у вантажних і пасажирських перевезеннях. В сучасних умовах експлуатації залізниць особлива увага надається питанню забезпечення необхідного рівня міцності, стійкості, надійності та довговічності залізничної колії, у тому числі і земляного полотна, як однієї з основних несучих конструкцій.

Зростаючі обсяги будівництва залізниць в Україні ставлять нові задачі в області будівництва та експлуатації колії та земляного полотна. Відомо, що окрім об'ємів будівництва також збільшуються об'єми ремонту та реконструкції земляного полотна, у тому числі і при модернізації під швидкісний рух. Таке збільшення об'ємів потребує запровадження нових технічних рішень щодо підсилення земляного полотна і, відповідно, збільшення термінів його нормальної експлуатації.

Стабільна робота земляного полотна під впливом рухомого транспорту є підґрунтям нормальної експлуатації залізниці в цілому. Відомо, що основними причинами катастроф на залізничному транспорті є стан колії (50 %), стан рухомого складу (43 %) і людський чинник (7 %). В зв'язку з цим однієї з основних задач, рішення якої передбачене в «Стратегії розвитку залізничного транспорту України на період до 2020 року», є, перш за все, переоснащення колійного господарства, що забезпечить підвищення швидкості руху вантажних поїздів до 100...120 км/год і пасажирських до 160...200 км/год.

Для забезпечення безперебійного і безпечного руху поїздів необхідно мати в своєму розпорядженні наукові розробки, що дозволяють своєчасно вивчати процеси, що відбуваються в земляному полотні, об'єктивно оцінювати його фактичний стан і обґрунтовано призначати заходи по забезпеченню міцності, стійкості, надійності і довговічності. Така задача дещо ускладнюється тим фактом, що стан земляного полотна не завжди є таким, що відповідає високим вимогам, а його конструкція має в собі дефекти, деформації та пошкодження, тобто воно є хворобливим.

Дослідження, що проводилися раніше щодо підсилення полотна були присвячені в основному оцінці його загальної або місцевої стійкості. Пізніше з'явилися роботи по вивченню питання підвищення ці-

її характеристики шляхом армування різними матеріалами і створення нових конструкцій земляного полотна. Разом з тим, досвід експлуатації залізниць і великомасштабні польові дослідження останніх років показали, що хворобливе земляне полотно не задовольняє вимогам швидкостей руху, що пред'являються. Аналіз даних показав, що в даний час проектувальники не завжди мають в своєму розпорядженні надійний апарат теоретичної оцінки міцності і стійкості земляного полотна, які базувалися б на сутності явищ, що відбуваються в тілі полотна в експлуатаційний період. Також слід відмітити, що параметри підсилення не мають відповідного наукового обґрунтування.

Існуючі на даний час методики розрахунку конструктивних елементів земляного полотна базуються на побудові плоских і дуже рідко об'ємних розрахункових схем конструкції та інтерпретації ґрунту земляного полотна з деякими припущеннями, які спрощують його реальну поведінку. У результаті конструкції земляного полотна вважаються нерациональними та неекономічними.

Посібник розроблено для вивчення напружено-деформованого стану земляного полотна залізниці шляхом математичного моделювання на основі методу скінченних елементів. У ньому наведено як загальні відомості про метод та професійний розрахунковий комплекс SCAD, так і практичні рекомендації щодо створення адекватних реальним умовам експлуатації скінченно-елементних моделей земляного полотна.

За структурою посібник відповідає календарному плану практичних занять дисципліни «Математичні методи моделювання взаємодії в системі "кріплення – масив"» для магістрів вищих навчальних закладів, які навчаються за спеціальністю 192 «Будівництво та цивільна інженерія».

Посібник дозволяє студентам вказаної спеціальності практично засвоїти курс «Математичні методи моделювання взаємодії в системі "кріплення – масив"» в повному обсязі на високому професійному рівні, а викладачу більш ефективно визначати рівень засвоєння матеріалу на основі контрольних запитань та завдань.

РОЗДІЛ 1

ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ

МЕТОДУ СКІНЧЕННИХ ЕЛЕМЕНТІВ

Останнім часом дослідження напружено-деформованого стану (НДС) земляного полотна усе менше спирається на методи, розроблені в рамках аналітичного підходу [5, 15, 16], що об'єктивно пов'язано з ускладненням конструктивних рішень у земляному полотні, застосуванням нових технологій його спорудження, а також розвитком нових підходів до самого процесу дослідження. Найбільшого поширення дістали чисельні методи [1, 10, 12]. Чисельні методи, такі як метод скінченних різниць (МСР), метод граничних елементів (МГЕ) і метод скінченних елементів (МСЕ), останнім часом набули значної теоретичної розробки і практичної реалізації, тому ряд задач, які розв'язуються з їх допомогою, значно розширився.

Метод скінченних елементів – чисельний варіаційний метод, що дозволяє вирішувати широкий клас різних задач, пов'язаних з розв'язанням диференціальних рівнянь. Найбільшого застосування МСЕ набув у задачах механіки твердого деформівного тіла, механіки суцільного середовища, механіки підземних споруд, теплопровідності, гідродинаміки та інших.

Ідея МСЕ як варіаційного методу полягає в тім, що функція, яка відшукується (переміщення, напруження, температура тощо), апроксимується сумою добутків деяких функцій (**координатні функції**) на множники, які варіюються. Як множники, які варіюються, приймають значення координатних функцій та їхніх похідних у **вузлах** скінченно-елементної сітки. Для визначення цих множників використовують принцип мінімізації похибки розв'язку задачі. Координатні функції, у свою чергу, вибирають таким чином, що кожна з них не дорівнює нулю тільки в невеликій області досліджуваного тіла, яка зветься **скінченним елементом** (СЕ). Внаслідок цього в будь-якій точці досліджуваного тіла розв'язок визначається тільки декількома функціями з усієї множини координатних функцій, які використовують (**функціями форми СЕ**).

Алгоритм дослідження земляного полотна із застосуванням МСЕ складається з таких етапів: дискретизація досліджуваної системи на СЕ й призначення вузлових точок, у яких визначаються вузлові переміщення; побудова матриць жорсткості; формування системи ка-

нонічних рівнянь, що відображають умови рівноваги у вузлах розрахункової системи; розв'язання системи рівнянь і обчислення значень вузлових переміщень; визначення компонентів напружено-деформованого стану досліджуваної системи за знайденими значеннями вузлових переміщень [9].

Метод скінченних елементів (МСЕ), який застосовано в даній роботі, з високою мірою наближення дозволяє розраховувати напружено-деформований стан середовища. При рішенні крайових задач механіки ґрунтів зручно виходити з варіаційного принципу Лагранжа, коли на дійсних переміщеннях повна потенційна енергія даного об'єму пружного ґрунтового середовища досягає мінімуму. Інакше кажучи, рішення задач МСЕ зводиться до задачі про мінімізацію функціонала. Розрахунок напружено-деформованого стану методом скінченних елементів передбачає виконання ряду операцій: розробку розрахункової схеми; програмування задачі для вирішення на електронно-обчислювальній машині і реалізацію рішення; попереднє представлення результатів; повторні рішення; остаточне представлення результатів.

Вирішення задачі в загальному вигляді зводиться до визначення у кожній точці тіла компонентів переміщень, напружень і деформацій:

$$\left. \begin{aligned} u &= f_1(x, y, z); \\ \sigma_x &= f_4(x, y, z); \\ \tau_{xy} &= f_7(x, y, z); \\ \varepsilon_x &= f_{10}(x, y, z); \\ \gamma_{zx} &= f_{15}(x, y, z). \end{aligned} \right\} \quad (1.1)$$

В кожній точці тіла, таким чином, визначається 15 невідомих компонентів: три компоненти переміщень (u, v, w), шість компонентів напружень ($\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z, \tau_{xy}, \tau_{xz}, \tau_{zy}$) та шість компонентів деформації ($\varepsilon_x, \varepsilon_y, \varepsilon_z, \gamma_{zx}, \gamma_{xy}, \gamma_{yz}$). Тому для вирішення загальної задачі треба мати 15 рівнянь, які можна було б застосувати до кожної точки всередині тіла, та граничні умови, правдиві для будь – якої точки поверхні, що обмежує тіло. Спільне рішення цих рівнянь дозволяє визначити НДС даного тіла за даних навантажень, тобто НДС розрахункової схеми реального об'єкту.

Розглянемо застосування варіаційних способів вирішення задач

теорії пружності для отримання основного рівняння методу скінченних елементів. Для цього використовується принцип мінімуму для переміщень. Припустимо, є деяке суцільне однорідне ізотропне пружне тіло V , що знаходиться у рівновазі під дією об'ємних сил Q та поверхневих сил P . Представимо це тіло як таке, що складається з скінченної кількості елементів різної форми, та, якщо це необхідно, різних розмірів. Вважається, що усі сили прикладені до вершин елементів. Невідомі компоненти переміщень вершин елементів позначаються через u_i, v_i, w_i , де $i = 1, 2, 3, \dots, n$; n – кількість вершин елементів.

Функція для переміщень має вигляд суми Релея-Рітца, що часто застосовується для вирішення задачі варіаційним способом:

$$\left. \begin{aligned} u &= \sum_{i=1}^n u_i f_i(x, y, z); \\ v &= \sum_{i=1}^n v_i \varphi_i(x, y, z); \\ w &= \sum_{i=1}^n w_i \psi_i(x, y, z), \end{aligned} \right\} \quad (1.2)$$

де f_i, φ_i, ψ_i – відомі функції координат, які задовольняють граничним умовам.

Потенційна енергія системи визначається рівнянням:

$$\mathcal{E} = \mathcal{E}(u, v, w) - \mathcal{E}(Q, P) \quad (1.3)$$

Загальний вигляд рівняння потенційної енергії деформації тіла та потенціалу зовнішніх сил встановлюється з аналізу рівнянь отриманих способом вираження потенційної енергії деформації як функції від переміщень (за допомогою рівняння Коші).

$$\mathcal{E}(u, v, w) = G \iiint_V \left\{ \begin{aligned} &\frac{1-\mu}{1-2\mu} \left[\left(\frac{\partial u}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial y} \right)^2 + \left(\frac{\partial w}{\partial z} \right)^2 \right] + \\ &+ \frac{2\mu}{1-2\mu} \left[\frac{\partial u}{\partial x} \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial y} \frac{\partial w}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial z} \frac{\partial u}{\partial x} \right] + \\ &+ \frac{1}{2} \left[\left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y} \right)^2 + \left(\frac{\partial w}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial z} \right)^2 \right] \end{aligned} \right\} dV \quad (1.4)$$

Тоді потенціал зовнішніх сил виражається, як:

$$\mathcal{E}(Q, P) = \iiint_V (Q_x u + Q_y v + Q_z w) dV + \iint_{\Omega} (P_x u + P_y v + P_z w) d\Omega \quad (1.5)$$

де $Q_x, Q_y, Q_z, P_x, P_y, P_z$ – проекції об’ємних та поверхневих сил, що діють на одиницю об’єму чи поверхню тіла, на вісі x, y, z .

Оскільки тіло, яке розглядається, складається з скінченної кількості окремих елементів, інтегрування в рівняннях треба замінити на сумування. З вище наведеного рівняння видно, що потенційна енергія деформації тіла є квадратичною функцією від переміщень його точок. З рівняння (1.1) переміщення точок тіла є функціями першого ступеню від переміщень вершин елементів. Тоді потенційна енергія деформації тіла може бути представлена як квадратична функція від u_i, v_i, w_i , тобто:

$$\mathcal{E}(u, v, w) = \sum_{i=1}^n \left[\alpha_i u_i^2 + \beta_i v_i^2 + \gamma_i w_i^2 + 2(\delta_i u_i v_i + \varepsilon_i v_i w_i + \xi_i w_i u_i) \right] \quad (1.6)$$

З рівняння (1.6) видно, що потенціал зовнішніх сил виражений функцією першого ступеню від переміщень точок тіла, або, враховуючи рівняння (1.1) – від переміщень вершин елементів

$$\mathcal{E}(Q, P) = \sum_{i=1}^n (F_{xi} u_i + F_{yi} v_i + F_{zi} w_i) \quad (1.7)$$

де F_{xi}, F_{yi}, F_{zi} , – компоненти зовнішніх сил, прикладених у вершинах елементів.

Подальший аналіз проводиться у матричному вигляді.

Позначимо вектор компонентів переміщень вершин елементів, що складають тіло, матрицею – стовпцем.

Тоді транспонований вектор переміщень вершин елементів буде виражатися матрицею-строчкою:

$$\{U\} = \{u_1 u_2 \dots u_n v_1 v_2 \dots v_n w_1 w_2 \dots w_n\}, \quad (1.8)$$

Вираз потенціальної енергії деформації тіла можна записати у матричній формі наступним чином:

$$\mathcal{E}(u, v, w) = \frac{1}{2} \{U\}^T [K] \{U\}. \quad (1.9)$$

Тоді рівняння потенційної енергії системи для цього випадку у матричній формі буде мати вигляд

$$\mathcal{E} = \frac{1}{2} \{U\}^T [K] \{U\} - \{U\}^T \{F\}. \quad (1.10)$$

Для визначення дійсних переміщень вершин елементів, що складають досліджуване тіло, знаходиться мінімум потенційної енергії системи, тобто рівняння потенційної енергії диференціюється за невідомими та отримані рівняння прирівнюються до нуля. Після здійснення операції диференціювання отримуємо

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial \mathcal{E}(u, v, w)}{\partial u_i} &= 2 \sum_{i=1}^n (\alpha_i u_i + \delta_i v_i + \xi_i w_i); \\ \frac{\partial \mathcal{E}(u, v, w)}{\partial v_i} &= 2 \sum_{i=1}^n (\beta_i v_i + \delta_i u_i + \varepsilon_i w_i); \\ \frac{\partial \mathcal{E}(u, v, w)}{\partial w_i} &= 2 \sum_{i=1}^n (\gamma_i w_i + \varepsilon_i v_i + \xi_i u_i). \end{aligned} \right\} \quad (1.11)$$

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial \mathcal{E}(Q, P)}{\partial u_i} &= \sum_{i=1}^n F_{xi}; \\ \frac{\partial \mathcal{E}(Q, P)}{\partial v_i} &= \sum_{i=1}^n F_{yi}; \\ \frac{\partial \mathcal{E}(Q, P)}{\partial w_i} &= \sum_{i=1}^n F_{zi}. \end{aligned} \right\} \quad (1.12)$$

Оскільки

$$\frac{\partial \mathcal{E}}{\partial u_i} + \frac{\partial \mathcal{E}}{\partial v_i} + \frac{\partial \mathcal{E}}{\partial w_i} = \frac{\partial \mathcal{E}(u, v, w)}{\partial u_i} + \frac{\partial \mathcal{E}(u, v, w)}{\partial v_i} + \frac{\partial \mathcal{E}(u, v, w)}{\partial w_i} - \left[\frac{\partial \mathcal{E}(Q, P)}{\partial u_i} + \frac{\partial \mathcal{E}(Q, P)}{\partial v_i} + \frac{\partial \mathcal{E}(Q, P)}{\partial w_i} \right] = 0 \quad (1.13)$$

то з виразів, використовуючи матриці, отримуємо

$$\{F\} = [K]\{U\}. \quad (1.14)$$

Це і є основне матричне рівняння методу скінченних елементів.

Контрольні запитання та завдання до розділу 1

1. Які чисельні методи застосовуються для сучасних досліджень?
2. В яких задачах і по якій причині МСЕ набув найбільшого застосування?
3. Назвіть основну ідею МСЕ як варіаційного методу та основні типи функцій, що характеризують скінченний елемент.
4. З яких етапів складається алгоритм дослідження земляного полотна із застосуванням МСЕ?
5. В чому полягає варіаційний принцип Лагранжа, що застосовується при вирішенні крайових задач механіки ґрунтів?
6. Побудуйте функцію суми Релея-Рітца для переміщень, що застосовується для вирішення задачі варіаційним способом.
7. Проаналізуйте основне матричне рівняння методу скінченних елементів з позиції варіаційного підходу.

РОЗДІЛ 2

ЗАГАЛЬНІ ВІДОМОСТІ

ПРО ПРОЕКТНО-ОБЧИСЛЮВАЛЬНИЙ КОМПЛЕКС SCAD

Для успішного вирішення задачі розрахунку напружено-деформованого стану велике значення має тип розрахункової схеми, що приймається, і порядок ідеалізації реальної конструкції земляного полотна. Розрахункова схема може розглядатися як сукупність граничних умов, зовнішніх і внутрішніх дій, властивостей матеріалів і називається скінченно-елементною моделлю (СЕ-моделлю). Її елементами в загальному вигляді є будь-які об'єкти, які можуть брати участь в розрахунку або просто повинні бути зображені на схемі, як допоміжні умовні позначення. Елементи СЕ-моделі повинні бути здатні самостійно відтворювати графічно результати рішення.

Відповідно до строгих рішень теорії пружності повне розсіювання напружень в пружному середовищі відбувається в нескінченному видаленні від місця додатку навантаження. У реальних середовищах практично повне розсіювання напружень, а, отже, і загасання переміщень, настає значно швидше. Тому розрахунок напружень і переміщень зводиться до визначення цих величин в деякій обмеженій області. Межі області встановлюються так, щоб за її межами збурення природного поля напружень додатковим навантаженням було б відносно невелике, тобто не привело до помітних деформацій.

Цією умовою слід користуватися для обмеження області, в якій визначається напружено-деформований стан земляного полотна. Надмірне збільшення області дослідження призводить до збільшення кількості елементів, що ускладнює розрахунок, або до збільшення розмірів цих елементів, що знижує точність рішення. Зменшення області дослідження може призвести до того, що вплив граничних умов внесе спотворення в напружено-деформований стан її периферійних ділянок. При призначенні сітки дискретизації (розбивки), як правило, слід дотримуватися наступних основних принципів.

У безпосередній близькості від прикладених навантажень, на ділянках, де визначення напружень повинне бути виконане з великою точністю, особливе в місцях, де очікуються найбільші градієнти напружень, слід призначати трикутні елементи якнайменших розмірів. Це дозволяє точніше встановити поле напружень на таких ділянках і понизити погрішність через його розриви. Відповідно, на ділянках, де

очікується плавна зміна напружень, розміри елементів можна збільшувати. Оскільки поле переміщень в рішеннях методом скінченних елементів безперервне, для задач, що вимагають визначення лише переміщень, можна використовувати грубішу сітку розбиття.

Якщо наперед складно визначити ділянку області, де слід деталізувати дослідження напружено-деформованого стану, можливе поетапне рішення задачі. У першому етапі задача розв'язується при відносно грубій сітці розбиття і для цієї сітки будується поле переміщень. Потім виділяється необхідна ділянка області, для чого будується детальна сітка розбиття, приймаються граничні умови в переміщеннях на основі попереднього рішення і задача доводиться до розрахунку напружень і деформацій.

Доцільно призначати таку сітку розбивки, щоб можна було скласти достатньо просту залежність, що зв'язує координати вузлових точок з номерами вершин. Всі види навантажень в методі скінченних елементів приводяться до зосереджених сил, прикладених у вузлових точках. Розподілене навантаження, діюче на якій-небудь поверхні, замінюється рівнодіючими зосередженими силами, які прикладаються до відповідних вузлів. Об'ємні сили, наприклад власна вага, також приводяться до зосереджених сил, діючих у вузлових точках.

При використанні МСЕ велику роль виконує точне визначення міцнісних і деформаційних характеристик ґрунтів насипу і основи, оскільки від них залежить напружено-деформований стан земляного полотна, і чим точніше будуть визначені ці характеристики, тим ближче до реальних значень виявляться одержані в результаті розрахунків величини напружень і деформацій.

Важливим етапом при розрахунках напружено-деформованого стану методом скінченних елементів є обробка і представлення результатів. Якщо кінцевою метою рішення задачі є визначення поля переміщень, то представлення результату стає простим. Відповідно до того, що переміщення будь-якої точки області є лінійною функцією координат, при відомих значеннях переміщень вузлових точок легко визначаються переміщення всіх інших. Практика показує, що точність рішення в цьому випадку достатньо висока навіть при грубій схемі дискретизації. Найбільші погрішності можуть мати місце поблизу області з різко різними показниками.

Значно складніше представлення результатів у вигляді полів напружень і деформацій. Ці поля мають розриви на межах між елемен-

тами. Значення напружень і деформацій залишаються постійними в межах кожного елемента, тобто можуть бути віднесені до будь-якої його точки. При недостатньо детальній сітці розбиття це може привести до грубого наближення. У будь-якому випадку, при кінцевих, хоч би і малих, розмірах елементів доводиться відносити набуті в розрахунку значення напружень і деформацій до деяких точок в межах елемента.

Визначення тензорів напружень і деформацій виконується після проведення повного циклу ітераційної процедури і є стандартною матричною операцією МСЕ, яка детально описана в багатьох фундаментальних роботах і не є новою. Практично аналітичні положення реалізуються надалі в професійному ліцензійному комплексі Structure CAD for Windows, version 7.31 R.4 (SCAD).

Проектно-обчислювальний комплекс (ПОК) SCAD [7, 11] призначений для чисельного дослідження на персональній електронно-обчислювальній машині (ПЕОМ) напружено-деформованого стану конструкцій. ПОК SCAD забезпечує дослідження широкого класу конструкцій, причому розрахунки виконуються на статичні й динамічні навантаження. Досліджувані об'єкти можуть мати довільні обриси, локальні ослаблення у вигляді отворів і порожнин різної форми, різні умови обпирання, що важливо для проведення розрахунку земляного полотна.

У ПОК SCAD розроблена розвинена бібліотека СЕ, яка включає в себе стрижні, чотирикутні й трикутні елементи плити, оболонки, чотирикутні й трикутні елементи плити на пружній основі; просторові елементи у вигляді тетраедра, паралелепіпеда, гексаедра загального виду; одновимірний і двовимірні (трикутні й чотирикутні) елементи для розв'язання осесиметричної задачі теорії пружності; спеціальні елементи, що моделюють зв'язок кінцевої жорсткості, пружну піддатливість між вузлами.

В основу комплексу покладено систему функціональних модулів, пов'язаних між собою єдиним інформаційним середовищем. Це середовище називається **проектом** і містить повну інформацію про розрахункову схему, її граничні умови, характеристики жорсткості, навантаження та їх комбінації, причому інформація наводиться у внутрішніх форматах комплексу й зберігається на диску у файлі (з розширенням **SPR**). Імена проекту і файла задаються під час створення нової схеми.

Під час створення проекту виконується алгоритм, який пов'язаний із роботою з **функціональними модулями SCAD**. Функціональні модулі SCAD діляться на чотири групи. Перша група (**графічний препроцесор і графічний постпроцесор**) – модулі, які забезпечують уведення початкових даних в інтерактивному графічному режимі й графічний аналіз результатів розрахунку. Друга група – модулі для виконання статичного й динамічного розрахунків (**процесор**), а також обчислення розрахункових поєднань зусиль, комбінацій завантажень, головних і еквівалентних напружень, реакцій, навантажень на фрагмент схеми, аналіз стійкості (**розрахункові постпроцесори**). Документування результатів розрахунку виконується модулями третьої групи. Четверта група – модулі проектування (**постпроцесори моделювання**), які служать для підбору арматури в елементах залізобетонних конструкцій, а також перевірки опору й підбору перерізів елементів сталевих конструкцій.

Модульна структура дає можливість сформувати для кожного користувача таку конфігурацію SCAD, яка максимально відповідає його потребам за класом вирішуваних задач, засобами створення розрахункових схем, аналізом і документуванням результатів розрахунку. Усі функціональні модулі комплексу реалізовані в єдиному графічному середовищі. Інтерфейс, сценарії взаємодії користувача з системою, функції контролю початкових даних і аналізу результатів повністю уніфіковані, що забезпечує мінімальний час освоєння комплексу й логічну послідовність виконання операцій. Високопродуктивний процесор дозволяє розв'язувати задачі статички й динаміки з великою кількістю степенів вільності.

Розрахунок супроводжується докладним протоколом, який може бути проаналізований як у ході виконання розрахунку, так і після його завершення. Система контролю початкових даних виконує перевірку розрахункової схеми й фіксує всі знайдені помилки й попередження. Для успішного розв'язання задач пошуку НДС конструкцій земляного полотна достатньо користуватися трьома групами модулів.

Контрольні запитання та завдання до розділу 2

1. Сукупністю яких фундаментальних елементів є розрахункова схема?
2. Якою умовою слід користуватися для обмеження області, в якій визначається напружено-деформований стан земляного полотна?

3. Який прийом створення моделі дозволяє точніше встановити поле напружень на ділянках прикладення навантажень?

4. Назвіть процеси створення моделі земляного полотна, неврахування яких призводить до отримання неточних результатів розрахунку.

5. Які типи елементів включає у себе бібліотека CE ПОК SCAD?

6. Назвіть чотири групи функціональних модулів SCAD та проаналізуйте специфіку кожного з них.

РОЗДІЛ 3

ПРАКТИЧНІ НАВИЧКИ МОДЕЛЮВАННЯ ЗЕМЛЯНОГО ПОЛОТНА У ПОК SCAD

3.1. Відомості про роботу з основними модулями ПОК SCAD

Графічний препроцесор. Для формування геометрії розрахункових схем у комплексі передбачено широкий комплекс створення схем за параметричними прототипами конструкцій, генерації сіток елементів на площині й у просторі, копіювання фрагментів схем, складання з підсхем і груп, різні функції геометричних перетворень. У режимі графічного діалогу задаються всі основні параметри схем, включаючи деформаційні характеристики елементів, умови спирання й примикання, статичні й динамічні навантаження тощо.

Набір засобів модифікації геометрії розрахункової схеми включає різні види геометричних перетворень, які дозволяють змінити масштаб всієї схеми або виділеного фрагмента, здійснити поворот навколо заданої осі, виконати дзеркальне відбиття, перенести частину схеми на вказану відстань тощо. Разом з широкою гамою засобів роботи з вибраними вузлами й елементами ці функції дають можливість створити розрахункову модель практично будь-якої складності.

Графічний постпроцесор. Важливим етапом розрахунку моделей є аналіз результатів розрахунку, які можуть бути подані у вигляді ізоліній та ізополів переміщень та напружень. Одночасно на схемі можуть виводитися й чисельні значення параметрів. Для статичних і динамічних навантажень передбачена можливість анімації процесу деформації схеми й запису цього процесу у форматі відеокліпу (файл з розширенням **AVI**). Будь-яка графічна інформація може виводитися на друк або зберігатися у форматі Windows Metafile (файл з розширенням **WMF**).

Також у комплексі реалізовані система фільтрів, функції фрагментації і колірні шкали, які забезпечують оперативний доступ до всіх видів результуючої інформації. Важливо, що при цьому є можливість виділити ту частину розрахункової схеми, на якій реалізувалися результати із заданого діапазону величин, приховавши решту частини схеми.

Фільтри. В умовах великих схем важливим процесом стало перенесення уваги від функцій формування до функцій контролю створеної схеми. Головну роль тут виконує реалізована в SCAD розвинена

система фільтрів, за допомогою яких встановлюються правила відображення інформації на схемі, а також функції візуалізації і фрагментації схеми. Фільтри дозволяють відібрати для відображення інформацію про розрахункову схему за десятками критеріїв. При цьому широко використовуються колірні засоби відображення вибраної інформації, які спільно з фрагментацією дозволяють відобразити будь-які параметри незалежно від розмірності моделі.

Документування результатів. Модулі документування результатів розрахунку дозволяють сформувати таблиці з початковими даними й результатами в текстовому або графічному форматах, а також експортувати їх в Microsoft Word або Microsoft Excel. Формування таблиць виконується з урахуванням груп вузлів і елементів, таблиці можна доповнити коментарями і включити в них графічну інформацію. Таким чином, звітний документ може редагуватися засобами Windows і набувати зручної для конкретного користувача форми (наприклад, відповідно до прийнятого в його фірмі стандарту), а експорт в Microsoft Excel дає можливість подальшої нестандартної обробки результатів стосовно конкретних обставин використання.

3.2. Основні операції зі створення моделі земляного полотна

У цьому розділі надано вибірккову інформацію про створення розрахункових схем земляного полотна, реалізованих як параметричні прототипи, причому скінченно-елементні моделі є просторовими на основі об'ємних СЕ, тому інші моделі (стрижневі, пластинчасті тощо) розглядаються менш детально. Таким чином, викладені принципи створення моделей не є загальними, тому для більш повного ознайомлення із створенням різних типів моделей слід звернутися до спеціальної літератури [9, 11]. Подальший виклад інформації є вибіркковим для того, щоб створювати лише визначений тип схем (деякі функції свідомо не розглядаються).

Усі операції зі створення, розрахунку та аналізу моделі виконуються курсорами, які пересуваються на моніторі за допомогою комп'ютерної миші.

У комплексі використовуються чотири типи курсорів:

 стандартний курсор – для вибору функції, режиму або операції;

 курсор з центральною мішенню – для вибору одного вузла або елемента;

 курсор із зображенням прямокутника – для вибору групи вузлів або елементів за допомогою рамки прямокутної форми;

 курсор із зображенням довільного багатокутника – для вибору групи вузлів або елементів за допомогою рамки довільної форми.

У тих випадках, коли виконувана операція триває довго, на екран виводиться курсор очікування – пісковий годинник. Після завершення операції повертається колишній курсор.

Більшість операцій формування розрахункових схем зосереджена в розділі **Схема** інструментальної панелі (рис. 3.1).



Рис. 3.1. Розділ **Схема** інструментальної панелі препроцесора

У цьому розділі можна виконати такі операції:

-  – генерація пластинчастої схеми;
-  – генерація типових поверхонь обертання;
-  – геометричні перетворення;
-  – копіювання схеми;
-  – копіювання фрагмента схеми;
-  – видалення схеми;
-  – складання схеми з декількох схем;
-  – автоматичну тріангуляцію на площині.

Геометричні перетворення. Діалогове вікно геометричних перетворень включає функції, що виконують модифікацію геометрії розрахункової схеми або її фрагмента (рис. 3.2). До них належать функції перенесення координат вузлів, повороту навколо заданої осі, масштабування, дзеркального відбиття тощо.

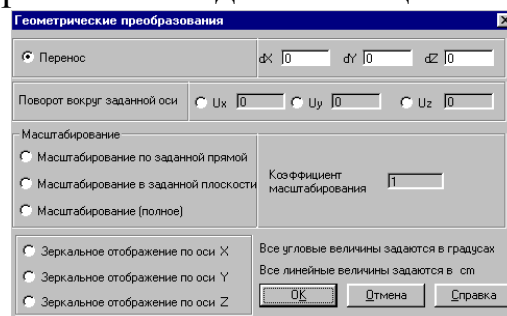


Рис. 3.2. Діалогове вікно **Геометрические преобразования**

Якщо режим перетворення стосується всієї схеми, то він буде виконаний після натиснення кнопки **ОК** діалогового вікна. Перетворюючи фрагмент (групу вузлів), слід спочатку його вибрати, а потім призначити й виконати необхідну функцію.

 **Копіювання схеми.** Дана операція є основною у випадку створення просторової розрахункової схеми на основі об'ємних СЕ, дія якої базується на копіюванні із заданими кроком та напрямом схеми-прототипу. Копіюватися може як готова схема, тобто з уведеними деформаційними характеристиками, шарнірами, зв'язками, навантаженнями тощо, так і схема, для якої задана тільки частина характеристик (рис. 3.3).

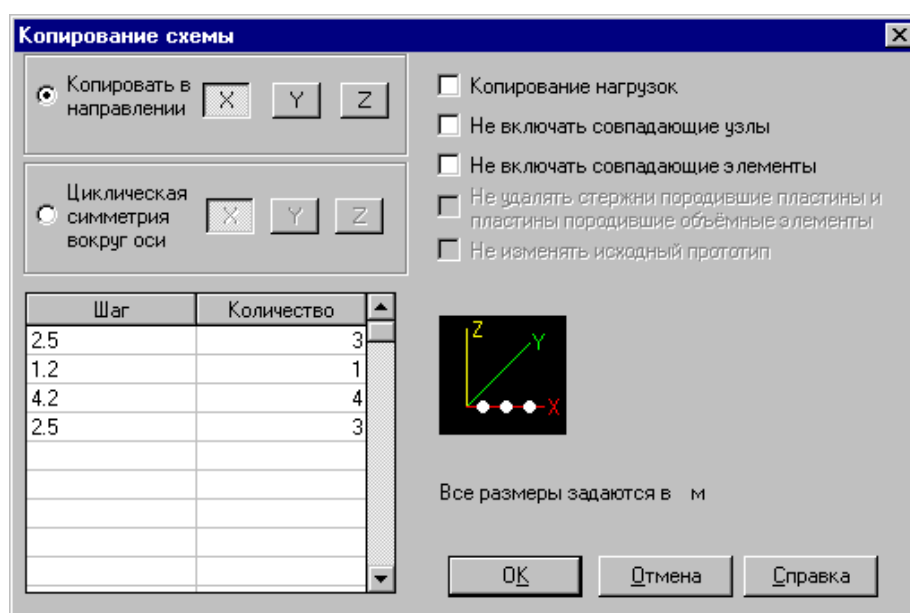


Рис. 3.3. Діалогове вікно **Копирование схемы**

Управління режимом копіювання виконується в діалоговому вікні **Копирование схемы** (рис. 3.3), у якому встановлюється напрям копіювання – по прямій уздовж осей загальної системи координат або по дузі кола навколо заданої осі (вісь обертання проходить через початок загальної системи координат). У обох випадках задаються кроки повторень прототипу й кількість повторень для кожного кроку, а також призначаються правила операцій із копією. Під час копіювання по дузі як крок вводиться центральний кут в градусах. Під час копіювання над копією можна провести такі операції, які призначаються активізацією відповідних маркерів:

1. **Копирование нагрузок**, тобто перенесення всіх навантажень зі

схеми-прототипу на схеми-копії.

2. **Не включать совпадающие узлы** – якщо в результаті копіювання з'являться вузли з однаковими координатами, то в результуючій схемі з них залишиться тільки один вузол. Два вузли вважаються збіжними, якщо відстань між ними менше величини, заданої користувачем.

3. **Не включать совпадающие элементы** – якщо в результаті копіювання з'являться елементи, усі вузли яких збігаються, то в результуючій схемі з них залишиться тільки один елемент.

4. **Не удалять стержни, породившие пластины**, – цей маркер буде доступний, якщо в схемі є відмічені стрижні. При активному маркері стрижні не видаляються з розрахункової схеми.

5. **Не изменять исходный прототип** – цей пункт дозволяє зберегти схему-прототип без змін у тих випадках, коли видаляються стрижні, що породжують пластини.

Для виконання операції копіювання слід виконати такий алгоритм:

1. У разі копіювання схеми без породження нових елементів у розділі **Схема** натисненням кнопки  активізувати режим копіювання; у діалоговому вікні **Копирование схемы** призначити параметри копіювання, правила операцій над копіями й натиснути кнопку **ОК**; після виконання копіювання підтвердити результати роботи або відмовитися від них.

2. У разі копіювання з породженням нових елементів у розділі **Узлы и Элементы** активізувати режим **Элементы**  натисненням кнопки вибору елементів  і вибрати на прототипі пластинчасті елементи, які повинні породжувати об'ємні тіла; у розділі **Схема** натисненням кнопки  активізувати режим копіювання; у діалоговому вікні **Копирование схемы** призначити параметри копіювання, правила операцій над копіями й натиснути кнопку **ОК**; після виконання копіювання підтвердити результати роботи або відмовитися від них.

У простому випадку копіювання схема просто повторюється із заданою кількістю раз. У процесі повторень виконується контроль збігу вузлів і елементів і, якщо був встановлений маркер виключення збіжних об'єктів, вони видаляються з результуючої схеми.

Під час копіювання схеми з відміченими вузлами й елементами створюються нові об'ємні тіла; якщо в схемі-прототипі були вибрані

пластинчасті елементи, кожен вибраний елемент породжуватиме об'ємний елемент (тип 36, 33 або 34), розмір якого у напрямі копіювання буде рівний заданому кроку копіювання (рис. 3.4).

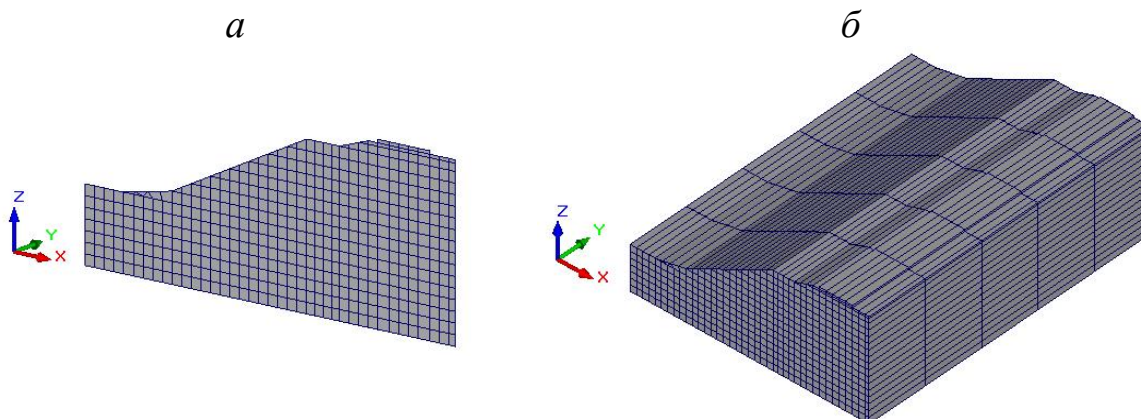


Рис. 3.4. Операція копіювання прототипу зі створенням об'ємного тіла: *а* – схема-прототип; *б* – схема після копіювання



Копіювання фрагмента схеми. Окрім копіювання повної схеми можливе й копіювання фрагмента. Як фрагмент розглядається будь-яка частина схеми, усі елементи якої вибрані. При копіюванні фрагмента не виконується створення об'ємних елементів з вибраних пластин. У діалоговому вікні **Копирование фрагмента схемы** задають кроки повторень вибраного фрагмента й кількість повторень для кожного кроку, а також призначають правила операцій над копією. У разі копіювання по дузі за крок приймається центральний кут у градусах.



Складання схеми з декількох схем. Часто при формуванні розрахункової схеми виникає необхідність її складання з декількох наперед приготованих підсхем елементів. При цьому схеми, які використовують для складання, можуть включати не тільки геометричні характеристики, але і зв'язки, жорсткості, навантаження тощо. Виконуючи складання, слід мати на увазі, що схеми, які беруть у ньому участь, повинні бути сформовані з однаковими одиницями вимірювання всіх величин. Для зручності схему, до якої приєднуються інші схеми, називатимемо основною, а приєднувані схеми – підсхемами. При цьому як основна схема може бути використаний навіть один вузол, а як підсхема – будь-яка інша схема, у тому числі й основна. Після виконання складання складена схема буде вже основною. Для виконання операції слід увійти до кнопки управління режиму складання (рис. 3.5).



Рис. 3.5. Кнопки управління **Режим сборки**

Таким чином, алгоритм складання такий: відкрити готовий проект з основною схемою; у розділі **Схема** натиснути кнопку , внаслідок чого в інструментальній панелі з'явиться група управляючих кнопок операції зборки (рис. 3.6), а в робочому – вікно для завантаження підсхеми; натиснути кнопку завантаження підсхеми , у вікні **Открытие проекта SCAD** вибрати ім'я файла проекту підсхеми й натиснути кнопку **Открыть (Open)**, внаслідок чого підсхема буде завантажена у вікно підсхеми; натиснути кнопку вибору способу складання , у діалоговому вікні **Сборка схемы** (рис. 3.6) призначити спосіб і правила складання і натиснути кнопку **ОК**; залежно від вибраного способу вибрати на схемі й підсхемі один, два або три вузли стикування і натиснути кнопку **ОК** на інструментальній панелі; після виконання складання на екран виводиться результуюча схема й діалогове вікно **Результат**, у якому пропонується вибрати варіант продовження роботи (рис. 3.7).

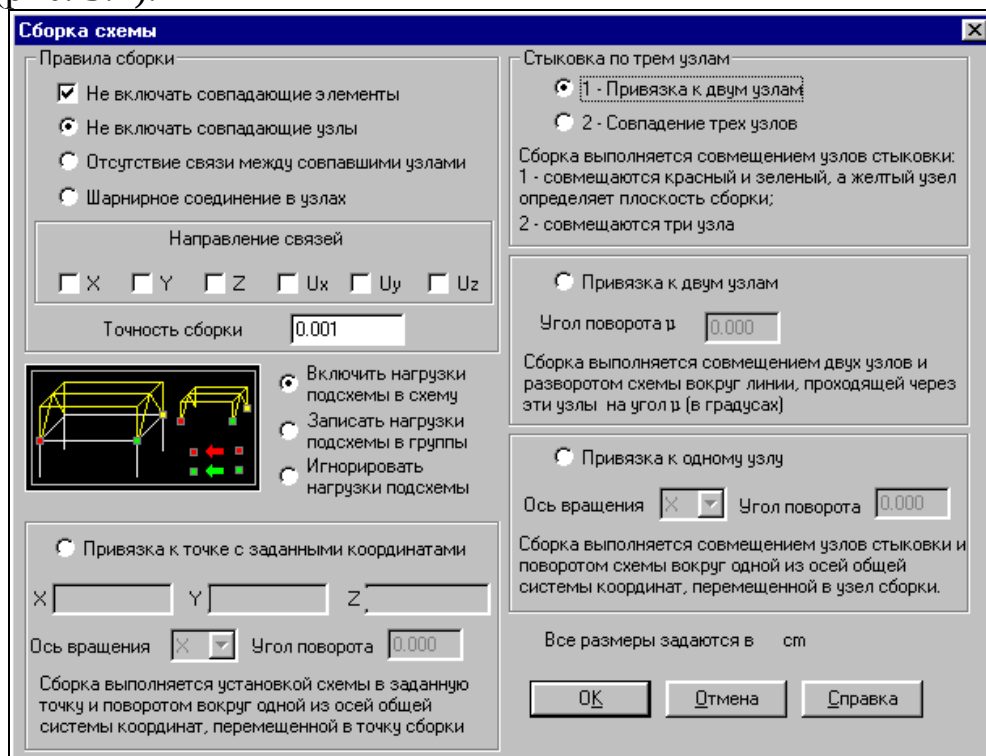


Рис. 3.6. Діалогове вікно **Режим сборки**

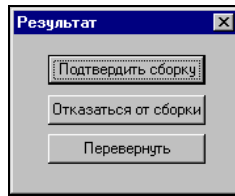


Рис. 3.7. Діалогове вікно **Результат**

Перший варіант – **Подтвердить сборку**. Відповідно до встановлених правил складання буде утворена нова основна схема як результат об'єднання основної схеми й підсхеми. Другий варіант – **Отказаться от сборки**. У результаті основна схема залишиться в тому ж стані, що і до складання. Третій варіант – **Проверить**. Підсхема займе нове положення щодо вузла/вузлів стикування, яке утворюється поворотом на 180° навколо вузлів стикування або заданої раніше осі обертання (у разі складання з одним вузлом стикування). Найбільш простим та ефективним є стикування двох вузлів, тому розглядається лише воно. **Стыковка по двум узлам** здійснюється поєднанням одноколірних вузлів стикування на схемі й підсхемі. Очевидно, що в цьому випадку підсхема може займати будь-яке положення щодо вузлів стикування й для того, щоб визначити його однозначно, необхідно задати кут повороту підсхеми навколо осі, що проходить через ці вузли.

 **Автоматична тріангуляція** замкнутої області довільної форми на площині є одним з найбільш універсальних засобів формування сіток скінченних елементів. У комплексі передбачена можливість використовувати тріангуляцію як для створення нової схеми, так і для тріангуляція фрагмента вже готової схеми.

Перед тим, як виконати тріангуляцію, необхідно завантажити в схему вузли, через які проходить контур, що обмежує область тріангуляції і, якщо це необхідно, внутрішні контури, в яких тріангуляція не виконується. Для завантаження схеми вузлів можна скористатися програмою AutoCAD for Windows.

Після введення вузлів активізуємо в розділі **Схема** функцію **Формирование треугольной сетки конечных элементов** на площині. В результаті в інструментальній панелі стануть доступні кнопки управління режимом тріангуляції (рис. 3.8).



Рис. 3.8. Кнопки управління режимом тріангуляції

Для триангуляції заданої області необхідно виконати наступну послідовність операцій:

- 1) натиснути кнопку **Задание контура**  і обвести «гумовою ниткою» опорні вузли зовнішнього контуру (під «опорними» розуміються вузли, що лежать в кутових точках контуру);
- 2) натиснути кнопку **Задание контура** і за потреби обвести «гумовою ниткою» опорні вузли внутрішнього контуру;
- 3) за потреби повторити попередню операцію для всіх внутрішніх контурів;
- 4) натиснути кнопку **Генерация сетки конечных элементов**  і встановити в діалоговому вікні параметри триангуляції (рис. 3.9);
- 5) після виходу з діалогового вікна натисненням кнопки ОК виконується розбиття заданої області на трикутні скінченні елементи.

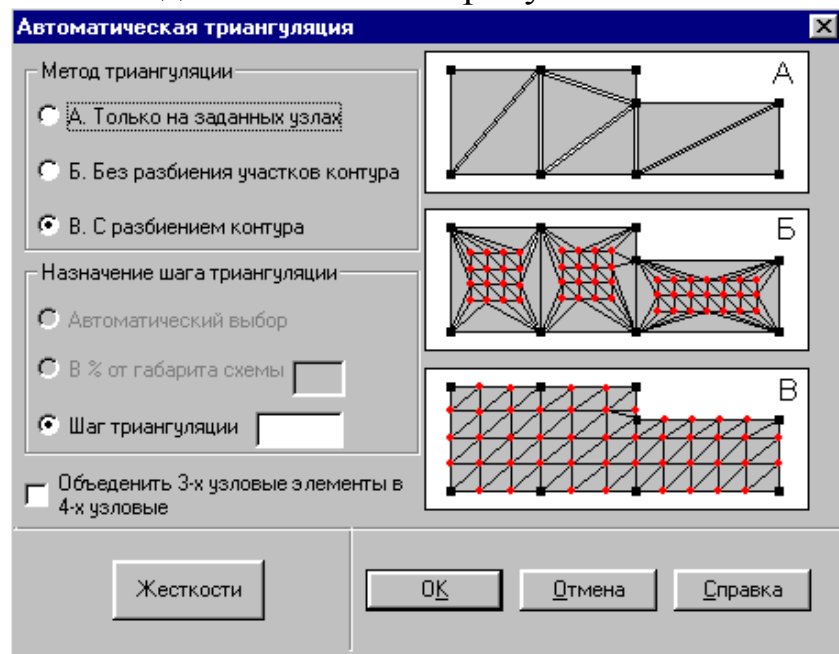


Рис. 3.9. Діалогове вікно **Автоматическая триангуляция**

Особливості введення контуру:

- при введенні ділянки контуру можна не зупинятися на вузлах, що лежать на прямій, що сполучає опорні вузли. Вони будуть введені в контур автоматично;
- замикання контуру виконується подвійним клацанням миші після введення останнього вузла або вказівкою на перший вузол;
- не допускається наявність співпадаючих вузлів (вузли, що мають однакові координати) як опорних, так і проміжних;

– не допускається попадання всередину контуру співпадаючих вузлів;

– не допускається наявність усередині контуру вузлів, що лежать від контуру на відстані менше 0,15 заданих кроків триангуляції, оскільки це приведе до появи вироджених трикутників;

– внутрішні контури не повинні перетинати або торкатися зовнішнього контуру і один іншого;

– не допускається наявність контурів, що лежать поза контуром, що обмежує область триангуляції.

Введений контур можна зберегти, натиснувши кнопку **Сохранение контура** . Якщо до моменту збереження задано декілька контурів, то всі вони зберігаються під одним ім'ям. Рекомендується зберігати кожен контур окремо. Для цього після введення і збереження контуру слід натиснути кнопку **Отказ** і лише після цього вводити новий контур. Перед виконанням триангуляції необхідно натисненням кнопки **Отказ** очистити схему від всіх контурів, потім послідовно викликати контури із списку, розташованого праворуч від кнопки збереження, і активізувати операцію **Генерация сетки конечных элементов** .

Перед виконанням триангуляції у вікні **Автоматическая триангуляция** (див. рис. 3.9) потрібно вибрати метод триангуляції. Відповідно до вибраного методу триангуляція може бути виконана: 1) тільки на заданих вузлах; 2) з розбиттям області триангуляції із заданим кроком уздовж координатних осей, але без введення додаткових вузлів на ділянках контуру, з розбиттям і контуру і області триангуляції відповідно до заданого кроку. Якщо в діалоговому вікні **Автоматическая триангуляция** встановлена ознака об'єднання трьохвузлових елементів в чотирьохвузлові, то в процесі формування схеми таке об'єднання буде виконане для всіх допустимих пар трикутників.

Схема, створена в результаті триангуляції, фактично є самостійною підсхемою, і після завершення триангуляції її потрібно «встановити на місце», тобто приєднати до вузлів, на яких виконувалася триангуляція (кнопка  – **Установка сформированной схемы по месту**).

Якщо підсхему передбачається приєднувати до інших фрагментів схеми, її можна зберегти і як самостійну схему, скориставшись для цього кнопкою  **Запись результатов триангуляции**. При цьому

схема повинна бути записана під новим ім'ям, відмінним від імені основної схеми.

На відміну від створення нової схеми, триангуляція області, належній вже існуючій розрахунковій схемі, виконується шляхом заведення контуру безпосередньо на початковій схемі або її фрагменті. Після завершення триангуляції одержана схема може бути збережена як самостійна схема (кнопка **Запись результатов триангуляции**), встановлена по місцю в схему (кнопка **Установка сформированной схемы по месту**) або виконані обидві ці операції.

Остаточна фіксація результатів триангуляції виконується тільки після виходу з режиму триангуляції (віджата кнопка **Формирование треугольной сетки конечных элементов на плоскости**). В цьому випадку на екран виводиться результуюча розрахункова схема. Протягом одного «сеансу» можна виконати триангуляцію тільки однієї області, потім закрити режим триангуляції. Для триангуляції іншої області слід знову активізувати режим триангуляції.

3.3. Основні операції з вузлами та елементами

Після формування геометрії розрахункової схеми за допомогою описаних вище функцій часто виникає необхідність її коректування. Для цього в комплексі передбачений ряд функцій для роботи з вузлами й елементами, які включають різні операції уведення, видалення, відновлення, дублювання, перенесення тощо. Усі ці функції зосереджені в розділі інструментальної панелі **Узлы и Элементы** (рис. 3.10).



Рис. 3.10. Розділ **Узлы и Элементы** інструментальної панелі препроцесора: *a* – розділ **Узлы** ; *б* – розділ **Элементы** 

На рис. 3.10 зображена група кнопок режиму **Узлы и Элементы**, за допомогою яких виконують такі операції.

Узлы:



– видалення вузлів;

-  – відновлення видалених вузлів;
-  – уведення вузлів;
-  – уведення додаткових вузлів між вузлами;
-  – перенесення вузлів;
-  – об'єднання збіжних вузлів;
-  – уведення вузлів по дузі;
-  – уведення вузлів на заданій відстані від вибраних вузлів;
-  – відмітка вузлів;

Элементы:

-  – уведення три- і чотиривузлових елементів;
-  – видалення елементів;
-  – відновлення видалених елементів;
-  – відмітка елементів;
-  – об'єднання збіжних елементів.

Для зручності роботи з вузлами можна скористатися кнопкою їх відображення на панелі фільтрів . Для проведення операцій з вузлами чи елементами слід виконати операцію **відмітки** ( або ).

 Для **видалення вузлів** необхідно: натиснути кнопку **Удаление узлов**; вибрати на розрахунковій схемі вузли, що видаляються (вибраний вузол маркується червоним кольором); натиснути на кнопку **ОК** у розділі **Узлы и Элементы**. Одночасно з видаленням вузлів будуть видалені й елементи, які до них примикають. Якщо видаленим виявився не той вузол, його можна відновити, скориставшись операцією **Восстановление удаленных узлов** .

 **Уведення вузлів.** Ця операція застосовується в тій ситуації, коли створення схеми-прототипу за допомогою лише генерації пластин неможливе або у випадку добудови схеми. Для уведення вузлів слід виконати діалог, який наведено на рис. 3.11.

Рис. 3.11. Діалогове вікно **Ввод узлов**



Введения дополнительных узлов між вузлами. Ця операція використовується в тих випадках, коли необхідно додати вузли на прямій, що сполучає два раніше введені вузли.



Функція **перенесення вузлів** включає дві операції: перенесення на заданий вектор і перенесення в задану точку. Вибір операції і установка параметрів виконуються в діалоговому вікні **Перенос узлов** (рис. 3.12), яке з'являється після активізації функції.

Рис. 3.12. Діалогове вікно **Перенос узлов**



Объединение совпадающих узлов. Після натиснення кнопки **Объединение совпадающих узлов** з кожної групи вузлів зі збіжними координатами в схемі залишиться тільки один вузол, а інші будуть видалені. У елементах, які примикали до видалених вузлів, номери вузлів заміняться на ті, що залишилися в схемі.



Операція **введення вузлів на заданій відстані від вибраних вузлів** дозволяє увести нові вузли, кожний з яких знаходитиметься на заданій відстані від вибраних на схемі вузлів-прототипів. Після активізації операції з'являється діалогове вікно **Ввод узлов** (рис. 3.13), у

таблиці якого задаються відстані у вигляді прирощення до координат вибраних вузлів і кількість повторень.

	dX	dY	dZ	Количество
1				
2				
3				
4				
5				
6				
7				
8				
9				
10				
11				

Значения в м

ОК Отмена Справка

Рис. 3.13. Діалогове вікно **Ввод узлов по дуге окружности**

Для виконання операції у вікні вводиться необхідна інформація, діалог закривається, на схемі вибираються потрібні вузли й дія підтверджується кнопкою **ОК** на інструментальній панелі.

 Функція **Ввод пластин** дозволяє прив'язати до вже уведених вузлів три- і чотиривузлові елементи. За допомогою курсора  слід вибрати потрібну кількість вузлів і двічі натиснути **ліву** кнопку миші або кнопку **ОК** на інструментальній панелі. Якщо будуть вибрані три вузли – уведеться тривузловий елемент, якщо чотири – чотиривузловий.

 Для **видалення елементів** необхідно вибрати їх на схемі (вони маркуються червоним кольором) і натиснути кнопку **ОК** на інструментальній панелі. Якщо вузол або вузли належали елементам, що видаляються, то він (вони) видаляються разом з ними, і їх відновлення виконується функцією **Восстановление удаленных узлов** .

 **Відновлення видалених елементів.** Ця операція дає можливість відновити видалені елементи, якщо вони не були видалені з проекту операцією упаковки даних. Для відновлення видалених елементів необхідно виконати декілька операцій у такій послідовності: 1) натиснути кнопку **Восстановление удаленных элементов**, після чого всі видалені елементи маркуються на схемі жовтим кольором; 2) вибрати на схемі відновлювані елементи (елементи маркуються червоним кольором); 3) натиснути кнопку **ОК** в розділі **Узлы и Элементы**.

У процесі відновлення елементів також автоматично відновлюються вузли, які до них примикають.