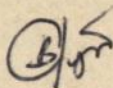


МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ УКРАЇНИ  
КИЇВСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ  
БУДІВНИЦТВА І АРХІТЕКТУРИ

На правах рукопису

РУТКОВСЬКИЙ Валерій Анатолійович



УДК 539.3, 624.046

ПРОСТОРОВЕ ПЛАСТИЧНЕ ДЕФОРМУВАННЯ ТА ТРІЩИНОУТВОРЕННЯ  
В МАССИВНИХ АРМОВАНИХ ТІЛАХ З ТОНКОСТІННИМ ОБЛИЦЮВАННЯМ

Спеціальність 05.23.17. - Будівельна механіка

Автореферат  
дисертації на здобуття наукового ступеня  
кандидата технічних наук

Київ 1994

АВ 31. 675

ЛННБ України ім.В.Стефаніка



00756194 (W)

Дисертація є рукописом.

Робота виконана на кафедрі будівельної механіки та Науково-дослідному інституті будівельної механіки Київського державного технічного університету будівництва і архітектури.

Науковий керівник - кандидат технічних наук ст.н.сп. О.Л.Козак

Офіційні опоненти: - доктор технічних наук, професор В.Г.Карнаухов

- кандидат технічних наук Г.Г.Влайков

Провідна організація Інститут проблем міцності національної академії наук України

Захист дисертації відбудеться "27" I 1995р. о 13 годіні на засіданні спеціалізованої ради К 068.05.04 Київського державного технічного університету будівництва і архітектури за адресою: 252037, м.Київ, Повітрофлотський проспект, 31.

З дисертацією можна ознайомитися в бібліотеці університету.

Автореферат розіслано "21" XII 1994р.

Вчений секретар спеціалізованої ради кандидат технічних наук

М.Г.Кушніренко

ЛНБ ім. В. Стефаніка

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Широке розповсюдження в будівництві знаходять комбіновані конструкції, які включають в себе масивні елементи і елементи, які можна віднести до класу оболонкових. Характерними прикладами таких масивно-оболонкових конструкцій є корпуси ядерних реакторів, захисні оболонки АЕС, резервуари великої ємкості, акумулятори тепла та інші.

Відмінності міцносних властивостей, характеру нелінійного деформування і мірності складових елементів подібних конструкцій призводять до значної неоднородності напружено-деформованого стану. Підвищені вимоги до інженерної безпеки таких конструкцій зумовлюють необхідність дослідження еволюції їх напружено-деформованого стану з урахуванням нелінійних факторів на всіх можливих етапах навантаження.

Відомі чисельні методики моделювання просторового нелінійного деформування та руйнування залізобетонних конструкцій не враховують у повній мірі специфіки сумісної нелінійної роботи крихких масивних і пластичних тонкостінних елементів, або орієнтовані на обмежений клас об'єктів, наприклад, осесиметричні. Тому розробка ефективного методу розрахунку комбінованих залізобетонних конструкцій загального виду є актуальною задачею будівельної механіки.

Мета роботи полягає в розробці ефективного чисельного методу для дослідження еволюції напружено-деформованого стану просторових комбінованих залізобетонних конструкцій з урахуванням процесів тріщиноутворення в бетоні та пластичних деформацій металоконструкцій і арматури в тривимірній постановці, а також створенні програмного забезпечення і використанні його для розрахунку реальних конструкцій енергетичного будівництва.

Методи дослідження. Використовується метод скінчених елементів (МСЕ). Чисельне моделювання нелінійного деформування та руйнування матеріалів здійснюється згідно з феноменологічними теоріями. Алгоритм розрахунку ґрунтується на методі Ньютона-Канторовича та багатосітковому методі.

Наукова новина дисертаційної роботи полягає у такому.

На основі концепції моментної схеми МСЕ запропоновано два нові ізопараметричні скінчені елементи. Елементи першо-

го типу призначені для моделювання деформування матеріалу, анізотропія якого обумовлена армуванням та тріщинами, а другого - для моделювання роботи оболонкових елементів у складі комбінованих конструкцій.

На основі концепції квазірегулярності дискретних моделей реалізовано новий варіант ітераційного багатосіткового алгоритму чисельного моделювання взаємозв'язаних процесів утворення тріщин в бетонному масиві і пластичного деформування металевих облицовальних елементів та арматури.

При дослідженні корпусу реактора ТР-1000ПБ отримані нові результати: вивчено підкріплюючий вплив металоконструкцій на напружений стан бетонного масиву, розраховано рівень граничного тиску, досліджено схему втрати несучої здатності конструкції.

Достовірність результатів розрахунків підтверджена шляхом порівняння з експериментальними даними і чисельними розрахунками, виконаними за іншими методиками. Точність розрахунків підтверджено шляхом дослідження збіжності чисельних результатів при послідовному згущенні розрахункових сіток і зменшенні кроку параметра інтегрування.

Практична цінність. Результати виконаних в дисертації досліджень використано на стадії технічного проектування корпусу ядерного реактора ТР-1000ПБ. Розроблена методика та програмний комплекс ARBEK-3D можуть бути використані в науково-дослідних і проектних організаціях для вивчення особливостей роботи будівельних конструкцій.

Дисертацію виконано у відповідності з планами наукових досліджень кафедри будівельної механіки та науково-дослідного інституту будівельної механіки Київського державного технічного університету будівництва і архітектури.

На захист вносяться розрахункові співвідношення нових скінченних елементів (масивного армованого елемента з тріщинами та облицовального елемента), новий варіант алгоритма нелінійного розрахунку на основі багатосіткового методу, результати досліджень напружено-деформованого стану, тріщиностійкості та несучої здатності складних комбінованих конструкцій.

Апробація роботи. Результати дисертаційної роботи допо-

відалися на Міжнародній науково-технічній конференції "Молоді вчені у вирішенні комплексної програми науково-технічного прогресу країн членів СЕВ" (м.Київ, 1989р.), Міжнародній науково-технічній конференції "Актуальні проблеми фундаментальних наук" (м.Москва, 1991р.), 51, 52, 53 та 54-ї науково-практичних конференціях Київського інженерно-будівельного інституту (м.Київ, 1990-93рр).

Публікації. Основний зміст дисертації опубліковано у восьми роботах.

Обсяг роботи. Дисертація складається з вступу, п'яти глав, висновків і містить 150 сторінок машинописного тексту, 51 малюнок, 3 таблиці та бібліографічний список з 140 найменувань.

### ЗМІСТ РОБОТИ

Ефективну чисельну методику моделювання нелінійного деформування і тріщиноутворення в комбінованих залізобетонних конструкціях загального виду розроблено шляхом синтезу концепцій теорії залізобетону та чисельних методів розрахунку масивних і оболонкових конструкцій.

Значний внесок у розвиток теорії залізобетону внесли такі вчені, як: Н.Х.Арутюнян, О.О.Гвоздев, А.Ф.Лолейт, В.І.Мурашов, А.Ф.Мілованов, П.Л.Пастернак, Й.І.Улицький та ін. Створенню математичних моделей нелінійного деформування та руйнування бетону і залізобетону, розробці методів розрахунку конструкцій присвячені роботи О.Я.Берга, В.М.Бондаренка, Г.О.Генієва, Ю.П.Гущі, А.С.Дехтяра, М.І.Карпенка, А.І.Козачевського, Л.К.Лукші, Н.М.Мулина, В.І.Мурашова, А.І.Ноткуса, О.О.Оатула, О.Р.Ржаніцина, Г.К.Хайдукова, О.В.Яшина та ін.

Чисельні методи дослідження просторових конструкцій розвинено у працях таких вчених, як: А.В.Александров, І.Я.Аміро, Дж.Аргіріс, В.А.Баженов, Д.В.Вайнберг, Ю.В.Веркжський, Г.Г.Влайков, Р.Галагер, О.С.Городецький, Я.М.Григоренко, В.І.Гуляев, О.І.Гуляр, В.А.Заруцький, О.Зенкевич, В.Г.Карнаухов, Ю.Л.Немчінов, В.Г.Піскунов, О.О.Расказов, Л.О.Розін, О.С.Сахаров, М.М.Шапошніков, Ю.М.Шевченко, В.К.Чибіряков, та інші.

Експериментальним та чисельним методам дослідження залі-

зобетонних конструкцій присвячені роботи А.Я.Барашикова, В.С.Здоренка, М.І.Карпенка, О.Л.Козака, В.П.Устинова, В.І.Кудашова, О.О.Оатула, D.Ngo, A.Nilson, A.Scordelis та ін.

Існуючі чисельні методи дослідження нелінійного деформування розглядуваного класу конструкцій орієнтовано на розрахунок об'єктів простої канонічної форми, для яких властиві невеликі параметри матриць жорсткості, що дозволяє використовувати прямі методи розв'язання системи алгебраїчних рівнянь. Так в методиці, запропонованій Нгуен Ши Чан, для розрахунку елементів морських бурових платформ, які мають циліндричну форму, використовується блочний метод Гауса для розв'язання систем рівнянь, що робить її непридатною для дослідження складних конструкцій загального виду.

В першому розділі дисертації приведені розрахункові співвідношення деформаційної теорії пластичності бетону, розробленої М.І.Карпенком, які адаптовано для розрахунку масивних залізобетонних конструкцій з урахуванням тріщиноутворення в тривимірній постановці. Представлено послідовність обчислювальних процедур, які реалізують запропоновану методику моделювання нелінійної роботи бетону в межах СЕ. Особливості урахування пластичних властивостей бетону продемонстровано на прикладі розв'язання контрольної задачі про одновісний розтяг та стиск зразка. На основі досліджень функції міцності бетону, запропонованої М.І.Карпенком, побудовано автоматичну методику сортування коренів квадратного рівняння при перевірці умови міцності. Стосовно розрахунку пластичної течії тонких металевих облицювальних елементів викладено процедуру корекції тензора напружень  $\sigma$ , обчисленого в припущенні пружної роботи матеріалу облицювання на черговому кроці навантаження.

В другому розділі дисертації на основі онцепції моментної схеми МСЕ і варіаційного рівняння Лагранжа отримано нелінійну систему рівнянь рівноваги в напруженнях масиву бетону з тріщинами та металевого облицювання з урахуванням ластичності. Виведено розрахункові співвідношення для побудови лінеаризованої матриці жорсткості масивного та облицювального елементів. Для дискретизації масивно-оболонкових комбінованих конструкцій розроблено два нові восьмивузлові ізопара-

метричні СЕ; масивний та облицовальний. Використовується полілінійний закон апроксимації переміщень:

- для масивного СЕ

$$U^k = \frac{1}{8} \sum_{n=1}^8 U_{(n)}^k \left( 1 + \frac{x^1}{x_{(n)}^1} \right) \left( 1 + \frac{x^2}{x_{(n)}^2} \right) \left( 1 + \frac{x^3}{x_{(n)}^3} \right),$$

де  $U_n^k$  - глобальні компоненти вектора переміщень  $n$ -го вузла елемента,  $x_n^i$  - його місцеві координати, а  $U^k$  - глобальні переміщення довільної точки в межах СЕ з місцевими координатами  $x^i$ ;

- для облицовального СЕ

$$U^i = \frac{1}{4} \sum_{n=1}^4 \left( u_{(n)}^i + \varphi_{(n)}^i \left[ \frac{1}{2} + x^1 \right] \right) \left( 1 + \frac{x^2}{x_{(n)}^2} \right) \left( 1 + \frac{x^3}{x_{(n)}^3} \right);$$

$$u_n^i = U_{2n}^i; \quad \varphi_n^i = U_{2n}^i - U_{2n-1}^i;$$

де  $U_{2n}^i$  і  $U_{2n-1}^i$  - компоненти переміщень вузлів на нижній і верхній поверхнях облицовання. Нижню поверхню (при  $x^1 = -1/2$ ) вважається та, по якій здійснюється контакт облицовання і масиву бетону. Таким чином, для облицовальних СЕ невідомі - це переміщення стиковочних вузлів  $u_n^i$  та узагальнені кути повороту ребер  $\varphi_n^i$ , направлених по товщині облицовки. Така заміна перемінних, з одного боку, забезпечує сумісність переміщень масивних і тонкостінних елементів комбінованих конструкцій, а з другого боку, дозволяє зберегти добру обумовленість матриці жорсткості при відшаруванні облицовки.

При побудові розрахункових співвідношень масивного СЕ використовувалась концепція нелінійного двохкомпонентного макрооднорідного середовища "матриця-армування", анізотропія властивостей якого попередньо обумовлена армуванням і змінюється в процесі утворення тріщин у матеріалі матриці. Тензор констант деформування модельного середовища  $\hat{C}$  представимо у вигляді суми відповідних тензорів матриці  $\hat{C}_m$  і арматури  $\hat{C}_a$ . Компоненти тензора  $\hat{C}_a$  для стержневого армування по напрямках координатних ліній  $x^i$ , обчислюються так

$$C_{a1}^{mnpq} = \mu_{a(1)} E_a \delta_{(1)}^m \delta_{(1)}^n \delta_{(1)}^p \delta_{(1)}^q / (g_{(11)})^2,$$

де  $E_a$  - миттєвий сікучий модуль матеріалу армування,  $\mu_{a1}$  - коефіцієнт армування по  $i$ -у напрямку.

Припускається послідовне утворення трьох взаємоортого-

нальних тріщин. Поява кожної нової площини тріщин моделюється шляхом корекції тензора  $\hat{C}_n$ , відповідного попередньому стану матеріалу матриці. Наприклад, при утворенні першої тріщини з нормаллю  $\vec{n} = \vec{r}_1$ , тензор  $\hat{C}_{n1}$  обчислюється так

$$\hat{C}_{n1} = \hat{C}_{n0} - \hat{C}_{n1n} - \hat{C}_{n1t},$$

де  $\hat{C}_{n1n}$  забезпечує виконання умови рівності нулю нормальних напружень  $\sigma_{n1n}^{i^*j^*k^*l^*}$ , а  $\hat{C}_{n1t}$  - дотичних напружень  $\sigma_{n1t}^{i^*j^*k^*l^*}$  в площині тріщини і парних з ними напружень  $\sigma_{n1n}^{(1+\alpha)^*i^*j^*k^*l^*}$  ( $\alpha=1,2$ ).

$$C_{n1n}^{i^*j^*k^*l^*} = C_{n0}^{i^*j^*k^*l^*} - C_{n0}^{i^*j^*k^*l^*} / C_{n0}^{i^*i^*j^*j^*k^*k^*l^*l^*};$$

$$C_{n1t}^{i^*j^*k^*l^*} = G_n \left[ \delta_{1n}^{i^*} \delta_{(1+\alpha)}^{j^*} - \delta_{1n}^{k^*} \delta_{(1+\alpha)}^{l^*} + \delta_{1n}^{i^*} \delta_{(1+\alpha)}^{j^*} - \delta_{(1+\alpha)}^{k^*} \delta_{1n}^{l^*} + \right. \\ \left. + \delta_{(1+\alpha)}^{i^*} \delta_{1n}^{j^*} - \delta_{(1+\alpha)}^{k^*} \delta_{1n}^{l^*} + \delta_{(1+\alpha)}^{i^*} \delta_{1n}^{j^*} - \delta_{(1+\alpha)}^{k^*} \delta_{1n}^{l^*} \right];$$

де  $G_n$  - модуль деформацій другого роду матеріалу матриці.

Третій розділ роботи присвячено побудові алгоритму та його програмній реалізації. Моделювання нелінійної роботи комбінованих конструкцій здійснюється на базі кроково-ітераційного алгоритму продовження по параметру та багатосіткового методу. На кожному кроці спочатку методом додаткових навантажень розв'язується задача пластичного деформування, а потім по методу змінних жорсткостей моделюється процес тріщиноутворення.

Запропонований в даній роботі варіант багатосіткового алгоритму орієнтовано на використання топологічно-нееквівалентних квазірегулярних скінченно-елементних моделей. Його основною перевагою є організація ітераційного процесу на локальних сітках вищого рівня, за рахунок чого забезпечується висока ефективність при дослідженні зон концентрації напружень. Так, починаючи з деякого рівня  $N$  (назвем його материнським), ітерування на сітках вищих рівнів виконується не по всій області, а тільки на сітках, нанесених на підобласті, які включають зони концентрації напружень і обмежені зонами їх припустимого впливу. Запропонований алгоритм можна розглядати як розгалуження основного ітераційного процесу, що виконується на сітці материнського рівня, на відносно незалежні ітераційні процеси по локальним підобластям концентрації. При цьому взаємний вплив локальних сіток здійснюється

через сітку материнського рівня як по переміщенням, так і по реакціям, що забезпечує компенсацію помилок при виборі кордонів припустимого впливу концентраторів. Особливістю розробленого варіанту багатосіткового алгоритму є також використання співвідношень інтерполяції і проєктування, які випливають з концепції МСЕ та законів будівельної механіки. Так, для інтерполяції приймалась та сама функція, що й при апроксимації переміщень в межах масивного СЕ:

$$U_{I+1}^{k'} = \frac{1}{8} \sum_{n=1}^8 U_{I(n)}^{k'} \left[ 1 + \frac{x^1}{x_{(n)}^1} \right] \left[ 1 + \frac{x^2}{x_{(n)}^2} \right] \left[ 1 + \frac{x^3}{x_{(n)}^3} \right],$$

де  $U^{k'}$  - компоненти переміщень вузла сітки рівня  $(I+1)$ , який у місцевій системі координат скінченного елемента рідкої сітки рівня  $I$  має координати  $x^1$ . Співвідношення для проєктування вузлових навантажень випливає з прийнятого закону інтерполяції переміщень та вимоги рівності робіт зовнішніх сил на сітках всіх рівней:

$$F_{In}^{k'} = \frac{1}{8} F_{I+1}^{k'} \left[ 1 + \frac{x^1}{x_{(n)}^1} \right] \left[ 1 + \frac{x^2}{x_{(n)}^2} \right] \left[ 1 + \frac{x^3}{x_{(n)}^3} \right],$$

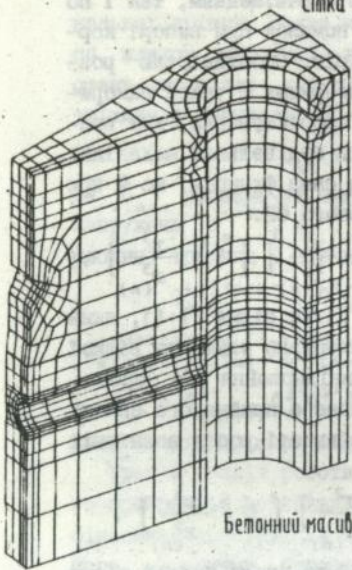
де  $F_{In}^{k'}$  - компоненти сили, прикладеної до вузла густої сітки рівня  $(I+1)$ , а  $F_{I+1}^{k'}$  - еквівалентні їй сили, що прикладені до восьми вузлів скінченного елемента сітки рівня  $I$ .

Четвертий розділ роботи присвячено розгляду питань збіжності та достовірності розробленої чисельної методики.

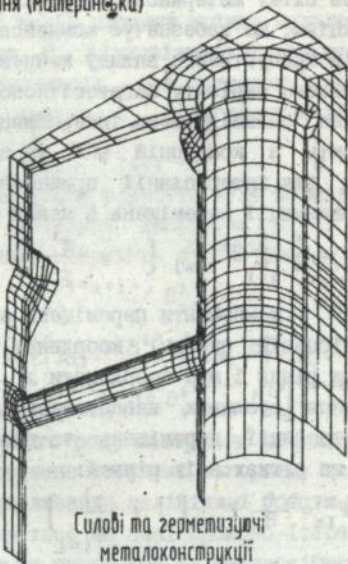
Розглянуто складну просторову конструкцію - попередньо напружений залізобетонний корпус (ПЗБК) ядерного реактора ТР-1000ПБ, що являє собою товстостінний багатопорожнинний циліндр з облицюванням всіх його поверхонь тонким сталевим листом. Опорні зони перекриття шахт підсилені металевими кільцями та ребрами жорсткості. Бетон зазначених областей підсилено також за рахунок збільшення кількості стержневої арматури. Зважаючи на циклічну симетрію об'єкту та схему його навантаження, розраховувався сектор в  $15^\circ$  (мал.1,а). Порядок МК дискретної моделі 12234 при ширині стрічки 1446.

Для розв'язання системи рівнянь блочним методом Гауса потрібно 13 годин машинного часу на ПК типу IBM PC/AT 386/387SX, з тактовою частотою 25МГц, а для розміщення МК - 70 Мбайт зовнішньої пам'яті. Використання багатосіткового мето-

Сітка 1-го рівня (материнська)

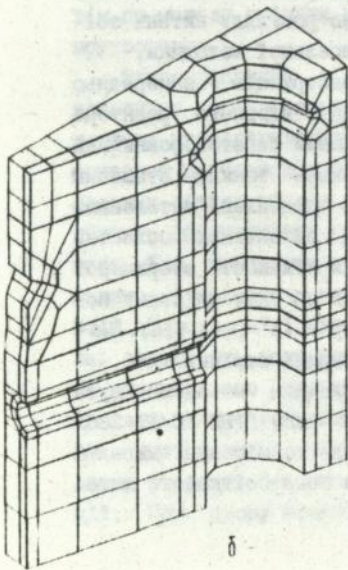


Бетонний масив



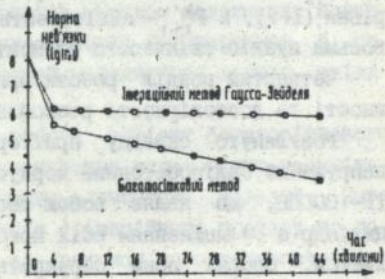
Силові та герметизуючі металоконструкції

Допоміжна сітка 0-го рівня



б

а



б

Табл. 1

Згальована кількість зовнішніх терець, циклів	Згальовний час розрахунку, год. : хв.	Відхилення по перенесенню, %	Відхилення по напруженню, %	Норма втрати сталі
0	00:00	-	-	1.2%±0.08
1	00:04	2.3	99.6	5.4%±0.05
2	00:07	19	84.1	3.2%±0.05
3	00:12	10	66.1	1.9%±0.05
4	00:16	6	28.2	1.8%±0.05
5	00:20	4.2	19.6	6.6%±0.04
6	00:25	3.1	10.0	3.9%±0.04
7	00:29	2.2	5.9	2.3%±0.04
8	00:34	1.4	3.1	1.3%±0.04
9	00:38	0.9	1.5	7.5%±0.03
10	00:44	0.6	0.8	4.4%±0.03

Мал. 1

ду дозволило за 44 хвилини одержати рішення, для якого в області концентрації напружень максимальна помилка як по переміщенням, так і по напруженням не перевищує 1% (табл.1). Сумарний об'єм зовнішньої пам'яті для зберігання МК основної густої сітки 1-го рівня (мал.1,а), та допоміжної рідкої сітки 0-го рівня (мал.1,б) складає близько 4,5Мбайт. Таким чином, багатосітковий метод забезпечує більш ніж 15 кратну економію машинного часу і необхідним ресурсам зовнішньої пам'яті ЕОМ. Графіки, наведені на мал.1,в демонструють значну перевагу багатосіткового методу в порівнянні з традиційним методом Гауса-Зейделя відносно швидкості збіжності.

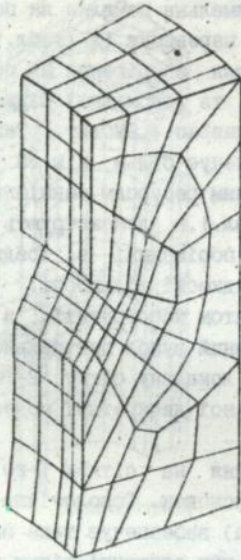
Найбільш відповідальним елементом конструкції, з точки зору її інженерної безпеки, є опорний вузол центральної шахти, для якого було розроблено локальну сітку 2-го рівня (мал.2,б). Число невідомих локальної дискретної моделі 8478 при ширині стрічки 2082.

Порівняння результатів рішення на сітках 1-го і 2-го рівней дозволило зробити такий висновок. Топологічна структура материнської сітки (мал.2,а) забезпечує таке описання досліджуваного концентратора, яке при згущенні сітки призводить до нескінченного росту розрахункових параметрів напружено-деформованого стану. Так на сітці материнського рівня для досить великих SE параметр тріщиноутворення S дорівнює 5 (мал.2,в). Завдяки тому, що при побудові локальної сітки було точно враховано реальну геометрію підкріплюючих металоконструкцій, величина параметра тріщиноутворення в області бетону, яка знаходиться між ребрами жорсткості, дорівнює 3,8, а на контакт з ребром - 3,2 (мал.2,г). Використання локальної сітки дозволило вивчити підкріплюючий вплив ребер жорсткості на міцність бетону і уточнити розподіл параметрів напружено-деформованого стану по кільцевій координаті.

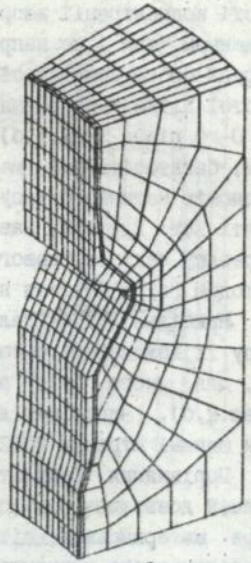
Ефективність розробленої методики дослідження процесу розвитку тріщин в бетоні демонструється на прикладі рішення задачі про руйнування моделі залізобетонної кришки ядерного реактору (мал.3). Аналіз результатів розрахунку показує добру узгодженість з даними натурних випробувань. Так, розрахунковий рівень граничного внутрішнього тиску на 5,5% менше тиску, одержаного в експерименті (мал.3,а). Значно вищу точ-

Фрагмент сітки материнського рівня

Локальна сітка 2-го рівня



а



б

Ізольні параметра тріщиноутворення  $S$

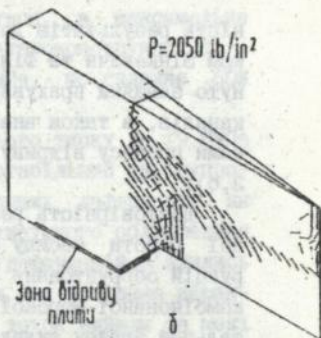
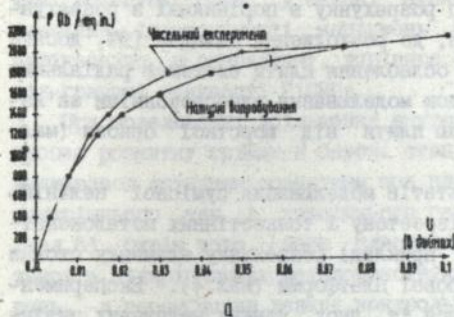


б

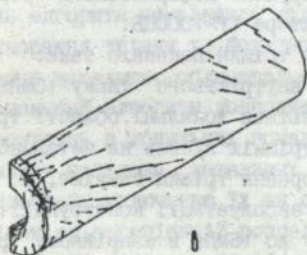
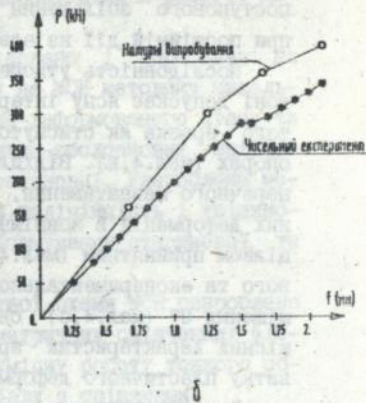
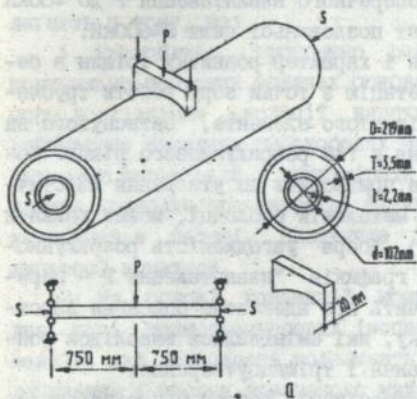


з

Мал. 2



Мал. 3



$P=344 \text{ kN}$



Мал. 4

ність результатів даного розрахунку в порівнянні з розрахунком Зінкевича та Філіпса, де розходження складає 19%, досягнуто завдяки врахуванню ослаблення плити системою радіальних каналів, а також внаслідок моделювання односторонніми зв'язками процесу відриву краю плити від жорсткої основи (мал. 3,б).

Достовірність результатів моделювання сумісної нелінійної роботи масиву залізобетону і тонкостінних металокопункцій обґрунтована на прикладі розрахунку елемента стояка комбінованої морської бурової платформи (мал.4). Експериментальний зразок складається із двох тонких металевих циліндричних оболонок, простір між якими заповнено бетоном (мал. 4,а). Досліджувалась робота трубчатого елемента в процесі поступового збільшення поперечного навантаження  $P$  до 400кН при постійній дії на елемент поздовжньої сили  $S=600кН$ .

Послідовність утворення і характер розвитку тріщин в бетоні допускає ясну інтерпретацію з точки зору роботи трубчатого зразка як стиснуто-зігнутого елемента, затиснутого на опорах (мал.4,в). Відхилення в 14% розрахункового рівня поперечного навантаження, яке призводить до утворення пластичних деформацій в зовнішній металевій оболонці, можна вважати цілком прийнятним (мал.4,г). Добра узгодженість розрахункового та експериментального графіків "навантаження  $P$  - переміщення  $U$ " (мал.4,б) свідчить про адекватне описання жорсткісних характеристик зразку, які змінювались внаслідок розвитку пластичного деформування і тріщиноутворення.

В п'ятому розділі дисертаційної роботи приводяться результати дослідження еволюції напружено-деформованого стану та руйнування ПНЗБК ядерного реактора ТР-1000ПБ.

Дослідження процесу утворення тріщин показало таке:

При експлуатаційному рівні внутрішнього тиску 10МПа в зонах опирання перекриття з'являються локальні області тріщин. Внаслідок перерозподілу внутрішніх зусиль на металокопункції та арматуру, процес утворення тріщин затухає, що не перешкоджає подальшій нормальній експлуатації конструкції.

Збільшення внутрішнього тиску до 15МПа в аварійному режимі призводить до появи досить великих зон тріщин (глибина проникнення тріщин у масив бетону досягає 1,1м). Разом з

тим, розвиток тріщин у бетоні зупиняється, а максимальне значення інтенсивності напружень в металоконструкції  $\sigma_1$ , зафіксоване в розрахунку, дорівнює 126МПа, що складає 60% від границі текучості 210МПа.

При моделюванні збільшення внутрішнього тиску до 19,8МПа процес розвитку тріщин в бетоні став нестабільний та супроводжувався активним розвитком зон пластичних деформацій як внутрішнього так і зовнішнього герметизуючого облицювання (мал.5). Окрім того, зони пластичних деформацій з'явилися також в підкріплюючих металоконструкціях зон опирання перекриття, а переміщення деяких контрольних точок вийшли за межі допустимого діапазону, що свідчить про втрату несучої здатності даної конструкції ПНЗБК ядерного реактора ТР-1000ПБ.

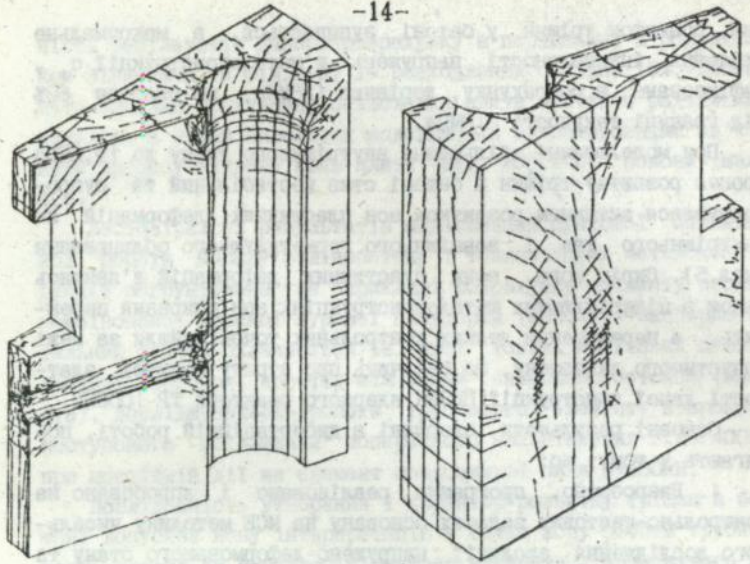
Основні результати, одержані в дисертаційній роботі, полягають у тому, що:

1. Розроблено, програмно реалізовано і впробовано на контрольно-тестових задачах основу на МСЕ методику чисельного дослідження еволюції напружено-деформованого стану та руйнування складних просторових масивно-оболонкових залізобетонних конструкцій в тривимірній постановці. Розроблена методика дозволяє враховувати фізичну нелінійність і тріщиноутворення в бетоні, пластичне деформування стержневої та листової арматури.

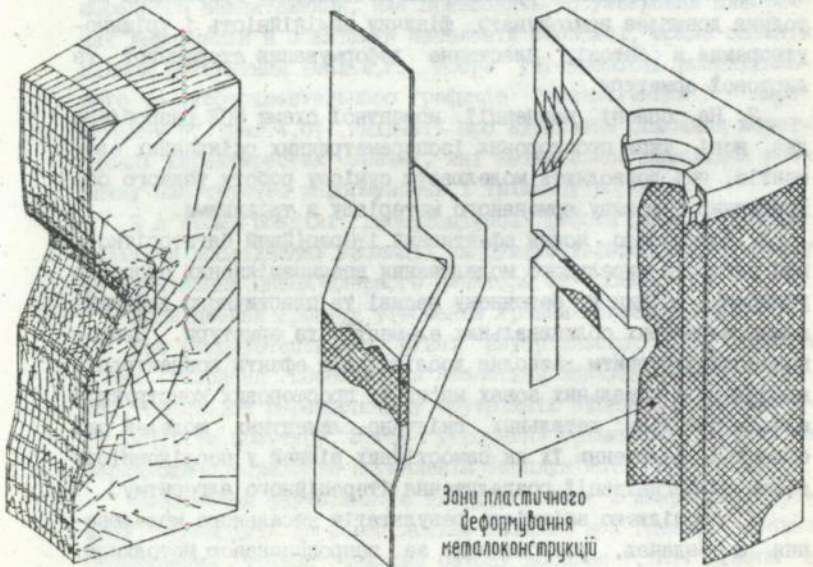
2. На основі концепції моментної схеми МСЕ розроблено два нові типи просторових ізопараметричних скінчених елементів, які дозволяють моделювати сумісну роботу тонкого облицювання і масиву армованого матеріалу з тріщинами.

3. Розроблено новий ефективний ітераційний багатосітковий алгоритм чисельного моделювання взаємозв'язаних процесів утворення тріщин у бетонному масиві та пластичного деформування металевих облицювальних елементів та арматури. Запропонований алгоритм дозволяє досліджувати ефекти концентрації напружень в локальних зонах масивних просторових конструкцій шляхом побудови детальних скінчено-елементних моделей цих областей, включенню їх як самостійних рівней у послідовність сіток та організації розгалуження ітераційного алгоритму.

4. Досліджено збіжність результатів чисельного моделювання в задачах, розв'язаних за запропонованою методикою.



$P=19,8 \text{ МПа}$



Співставлення результатів розрахунків контрольно-тестових задач з даними натурних випробувань та результатами розрахунків, отриманими за іншими чисельними методиками, засвідчує про добре узгодження схеми руйнування, початку тріщиноутворення, загальної деформативності та несучої здатності. Виявлено переваги розробленої методики порівняно з відомими при моделюванні руйнування в умовах складного тривісного напруженого стану.

5. Створено програмний комплекс ARBEK - 3D, який відповідає сучасним вимогам відносно модульності, лінгвістичного забезпечення, керування даними та графічної обробки результатів розрахунку.

6. Детально вивчено підкріплюючий вплив металоконструкцій на напружено-деформований стан бетону ПНЗБК реактора ТР-1000ПБ в тривимірній постановці. Досліджено тріщиностійкість корпусу реактора в заданому діапазоні значень внутрішнього тиску: від експлуатаційного (10.0 МПа) до максимального значення (15.0 МПа), можливого при аварії. Визначено несучу здатність ПНЗБК реактора ТР-1000ПБ. Одержано схему втрати несучої здатності і рівень граничного внутрішнього тиску.

7. Результати проведених досліджень і програмне забезпечення впроваджено в Інституті теоретичної і експериментальної фізики при проектуванні ПНЗБК ядерної установки з важководневим реактором підвищеної безпеки ТР-1000ПБ, що дозволило підвищити рівень розрахункового обґрунтування інженерної безпеки нової конструкції.

Основні наукові результати дисертаційної роботи відображені у таких публікаціях:

1) Оцінка прочності предварительно напруженного железобетонного корпуса по критерию Н.И.Карпенко // Опір матеріалів та теорія споруд. - Київ: Будівельник, 1992, Вип. 60. С.72-77. (співавтори Козак О.Л., Кушніренко М.Г.)

2) Автоматизированная система прочностных расчетов комбинированных конструкций КОМБИК-ЕС (краткое сообщение) // Керуючі системи і машини, Київ: Наукова думка, N3(101), 1989, С. 106-108. (співавтори Зверев О.А., Кислюкий В.Н., Козак О.Л., та ін.)

3) Математическое моделирование поведения железобетонных конструкций реакторных отделений АЭС по методу конечных элементов // Міжнародна науково-технічна конференція "Актуальні проблеми фундаментальних наук". Збірка доповідей. Том 1. Секція математичного моделювання. М: Видавництво МГУ, 1991, С.8-12. (співавтори Козак О.Л., Бояндін В.С.)

4) Многосеточный метод на квазирегулярных конечно-элементных моделях комбинированных конструкций с концентраторами напряжений - Рукопис деп. в ДНТБ України, № 1473 Ук93, Київ, 1993. (співавтори Сахаров О.С. Козак О.Л.)

5) Алгоритм расчета неоднородного напряженного состояния комбинированных конструкций на последовательности квазирегулярных сеток // Опір матеріалів та теорія споруд. Київ: Будівельник (друкується)

6) Исследование пространственного напряженно-деформированного состояния предварительно-напряженного железобетонного корпуса реактора ТР-1000ПБ// Тези доповідей 52-ї науково-практичної конференції КІБІ, Київ, 1991. С.90-91. (співавтор Козак О.Л.)

7) Численное исследование влияния силовых и герметизирующих металлоконструкций на напряженное состояние бетона корпуса реактора ТР-1000ПБ// Тези доповідей 53-ї науково-практичної конференції КІБІ, Київ, 1992 С.85. (співавтори Козак О.Л., Кушніренко М.Г.)

8) Исследование пространственного напряженного состояния корпуса реактора многосеточным методом// Тези доповідей 54-ї науково-практичної конференції КІБІ, Київ, 1993, С.161. (співавтор Козак О.Л.)

9) Автоматизированный программный комплекс для расчета трехмерных конструкций сложной конфигурации //Тези доповідей Міжнародної науково-технічної конференції студентів, молодих вчених та спеціалістів. Київ, 1989, С.64-65. (співавтор Семенов М.О.)

Rutkovskiy V.A. Space Plastic Deformation and Crack Development in Reinforced Massive Bodies with Thin-walled Facings. A thesis in manuscript form to search for academic degree of candidate of engineering science on profession 05.23.17 - Structural Mechanics, Kiev State Technical University of Constructions and Architecture.

The developed numerical methodology as well as its software implementation for investigation of non-linear deformation and cracking of space combined reinforced concrete structures under three-dimensional formulation are defended. Two new finite elements making possible to simulate the joint behaviour of the reinforced cracky mass and thin facings were developed. New efficient iterative multi-grid method of non-linear analysis was worked out. Stress-strain behaviour, resistance to cracking and collapse scheme of the nuclear reactor TR-1000PB prestressed concrete pressure vessel were studied.

Рутковский В.А. Пространственное пластическое деформирование и трещинообразование в массивных армированных телах с тонкостенными облицовками. Диссертация в виде рукописи на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.23.17.- Строительная механика, Киевский государственный технический университет строительства и архитектуры, Киев 1994г.

Защищается разработанная численная методика и реализующие ее программные средства для исследования нелинейного деформирования и трещинообразования пространственных комбинированных железобетонных конструкций в трехмерной постановке. Разработаны два новых конечных элемента, позволяющие моделировать совместную работу массива армированного материала с трещинами и тонких облицовок. Разработан новый эффективный итерационный многосеточный алгоритм нелинейного расчета. Исследованы напряженно-деформированное состояние, трещиностойкость и схема разрушения ПНЖБК ядерного реактора TR-1000PB.

Ключові слова: залізобетон, облицовання, скінченний елемент, тріщиноутворення, пластичність, напруження, деформації.

Подп. к печ. *ал. к. су.*

Бумага тип. № 3 . Способ печати офсетный. Услови. печ. л. 53.

Услови. кр.-отт. 1,04 . Уч.-изд. л. 1,0

Тираж 100 . Зак. № 4-3464 .

Фирма «ВИПОЛ»

252151, г. Киев, ул. Волынская, 60.

**AB 31.675**