

НАЦІОНАЛЬНА АКАДЕМІЯ НАУК УКРАЇНИ  
ІНСТИТУТ МЕХАНІКИ ІМЕНІ С.П. ТИМОШЕНКА

На правах рукопису

**КРИЦЬКИЙ ВОЛОДИМИР БОРИСОВИЧ**

УДК 539.3

**ЧИСЕЛЬНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ДИНАМІКИ ЗАХИСНИХ  
ОБОЛОНОК АТОМНИХ ЕЛЕКТРОСТАНЦІЙ ПРИ  
КОРОТКОЧАСНИХ НАВАНТАЖЕННЯХ**

01.02.04 – механіка деформівного твердого тіла

Дисертація  
на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук

Науковий керівник –  
**Луговий Петро Захарович,**  
доктор технічних наук, професор

**Київ – 2016**

## З М И С Т

стор.

<b>З М И С Т .....</b>	<b>2</b>
<b>ПЕРЕЛІК РИСУНКІВ.....</b>	<b>4</b>
<b>ПЕРЕЛІК ТАБЛИЦЬ .....</b>	<b>6</b>
<b>ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ .....</b>	<b>7</b>
<b>В С Т У П .....</b>	<b>8</b>
<b>РОЗДІЛ 1 ОСОБЛИВОСТІ КОНСТРУКЦІЇ І УМОВ ЕКСПЛУАТАЦІЇ ЗАХИСНОЇ ОБОЛОНКИ ЕНЕРГОБЛОКУ АЕС .....</b>	<b>28</b>
1.1 Конструкція і умови експлуатації ЗО енергоблоку АЕС .....	28
1.2 Основні вимоги до функціонування ЗО енергоблоку АЕС .....	32
1.3 Огляд досліджень динаміки ЗО АЕС при короткочасних навантаженнях .....	40
1.4 Висновки по розділу «Вступ» і розділу 1 .....	41
<b>РОЗДІЛ 2 ОСНОВНІ ПОЛОЖЕННЯ МЕХАНІКИ ТВЕРДОГО ДЕФОРМІВНОГО ТІЛА І МЕТОДУ СКІНЧЕНИХ ЕЛЕМЕНТІВ, ЗАСТОСОВАНІ ПРИ МАТЕМАТИЧНОМУ МОДЕЛЮВАННІ НДС І ДИНАМІЧНОЇ ПОВЕДІНКИ ЗО. ОБЧИСЛЮВАЛЬНІ АЛГОРИТМИ РОЗВ’ЯЗАННЯ РІВНЯНЬ ДИНАМІКИ ОБОЛОНКОВИХ КОНСТРУКЦІЙ .....</b>	<b>43</b>
2.1 Вихідні передумови, гіпотези і співвідношення .....	43
2.2 Моментна схема скінечних елементів в задачах визначення НДС і динамічної поведінки оболонкових конструкцій .....	49
2.3 Загальний алгоритм розв’язання задач динаміки оболонкових конструкцій .....	54
2.4 Висновки по розділу 2 .....	65
<b>РОЗДІЛ 3 РЕАЛІЗАЦІЯ ОБЧИСЛЮВАЛЬНИХ АЛГОРИТМІВ РОЗВ’ЯЗАННЯ РІВНЯНЬ ДИНАМІКИ ОБОЛОНКОВИХ КОНСТРУКЦІЙ В СКЛАДІ РОЗРОБЛЕНого ПРОГРАМНОГО ЗАСОБУ (ПЗ) «ДИПРОС» .....</b>	<b>67</b>
3.1 Призначення, характеристики і можливості ПЗ .....	67
3.2 Умови застосування ПЗ .....	75
3.3 Логічна структура ПЗ .....	76
3.4 Опис задач (об’єктів і процесів), які розглядаються в ПЗ .....	84
3.5 Вихідні дані ПЗ .....	91
3.6 Вихідні дані ПЗ .....	98
3.7 Виконання компонентів ПЗ .....	102
3.8 Досвід практичного застосування ПЗ .....	102
3.9 Історія розробки і розвитку ПЗ .....	105

3.10	Висновки по розділу 3 .....	109
<b>РОЗДІЛ 4</b>	<b>РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕННЯ ДИНАМІЧНОЇ ПОВЕДІНКИ, НДС І ПРАЦЕЗДАТНОСТІ ЗО ЕНЕРГОБЛОКУ АЕС ПРИ КОРОТКОЧАСНИХ НАВАНТАЖЕННЯХ В УМОВАХ ПРОЕКТНОЇ І ЗАПРОЕКТНОЇ АВАРІЙ .....</b>	<b>110</b>
4.1	Розрахункова МСЕ-модель ЗО.....	110
4.2	Моделювання навантаження на захисну оболонку від її передобтиснення армоканатами СПЗО .....	116
4.3	Верифікація розробленої розрахункової МСЕ-моделі ЗО енергоблоку АЕС .....	118
4.4	Результати модального аналізу МСЕ-моделі споруди ЗО .....	119
4.5	Дослідження динамічної поведінки, НДС і працездатності ЗО в умовах спільної дії факторів максимальної проектної аварії і проектного землетрусу (режим МПА+ПЗт) .....	120
4.6	Дослідження динамічної поведінки, НДС і працездатності ЗО у випадку вибуху повітряно-водневої суміші в РВ в умовах запроектної аварії .....	130
4.7	Впровадження результатів розрахунків НДС і динамічної поведінки ЗО АЕС при короткочасних навантаженнях в умовах проектної і запроектної аварій .....	135
4.8	Висновки по розділу 4 .....	138
<b>ВИСНОВКИ.....</b>	<b>140</b>	
<b>ДОДАТОК А</b>	<b>ДОКУМЕНТИ ЩОДО ВПРОВАДЖЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ДИСЕРТАЦІЙНОЇ РОБОТИ В ПРОЕКТНО-КОНСТРУКТОРСЬКИХ ОРГАНІЗАЦІЯХ І НА ПІДПРИЄМСТВАХ ЕНЕРГЕТИЧНОЇ ГАЛУЗІ УКРАЇНИ .....</b>	<b>142</b>
<b>ДОДАТОК Б</b>	<b>ДОКУМЕНТИ ЩОДО ВПРОВАДЖЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ДИСЕРТАЦІЙНОЇ РОБОТИ В НАУКОВО-ДОСЛІДНИХ ОРГАНІЗАЦІЯХ УКРАЇНИ .....</b>	<b>149</b>
<b>ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ .....</b>	<b>153</b>	

## ПЕРЕЛІК РИСУНКІВ

	стор.
Рис. 1	Розташування в Україні об'єктів атомно-енергетичної галузі ..... 8
Рис. 2	Зовнішній вигляд і осьовий переріз РВ енергоблоку АЕС ..... 12
Рис. 3	Осьовий перетин і структура стінки ЗО енергоблоку АЕС. Основні розміри конструкції ЗО ..... 12
Рис. 4	Зовнішні природні і техногенні екстремальні (потенційно аварійні) впливи на ЗО, які враховуються в проекті АЕС ..... 13
Рис. 5	Розрахункові МСЕ-моделі ЗО, застосовані в дослідженнях [2-5] ..... 14
Рис. 6	Розрахункові МСЕ-моделі ЗО, застосовані в дослідженнях [6-10] ..... 15
Рис. 1.1	Узагальнена схема розведення армоканатів СПЗО в купольній частині ЗО РВ енергоблоку АЕС ..... 29
Рис. 1.2	Узагальнена схема розведення армоканатів СПЗО в циліндричній частині ЗО РВ енергоблоку АЕС ..... 30
Рис. 1.3	Лист інституту «Атоменергопроект» (м. Москва, Росія) щодо проектування ЗО енергоблоків АЕС України відповідно до вимог загальобудівельних НД ..... 33
Рис. 2.1	Базова («глобальна») декартова ( $Z^1$ , $Z^2$ , $Z^3$ ) і місцева (локальна, пов'язаною з конкретним скінченим елементом) косокутна ( $X^1$ , $X^2$ , $X^3$ ) системи координат ..... 45
Рис. 2.2	Місцеві координати вузлів скінченого елемента ..... 45
Рис. 3.1	Структурна схема процесу розрахунку напружене-деформованого стану об'єкта ..... 81
Рис. 3.2	Структурна схема процесу графічного відображення результатів розрахунку напружене-деформованого стану об'єкта ..... 82
Рис. 3.3	Структурна схема процесу документування результатів розрахунку и графічного відображення напружене-деформованого стану об'єкта ..... 83
Рис. 3.4	Приклади типових топологічних моделей прийнятих для розрахунку об'єктів ..... 87
Рис. 3.5	Приклади МСЕ-моделей прийнятих для розрахунку об'єктів ..... 88
Рис. 3.6	Приклади прийнятих для розрахунку об'єктів, які мають отвори (вирізи), ребра і підобласті із різномірних матеріалів ..... 89
Рис. 3.7	Приклади інженерних конструкцій, для яких здійснювались оптимізація, розрахунок динамічних характеристик і аналіз НДС ..... 106
Рис. 3.8	Приклади комбінованих інженерних пластинчато-оболонкових конструкцій, для яких може здійснюватись оптимізація, розрахунок динамічних характеристик і аналіз НДС за допомогою ПЗ «ДИПРОС» ..... 108
Рис. 4.1	Зовнішній вигляд розрахункової МСЕ-моделі ЗО енергоблоку АЕС (ракурси 1 і 2) ..... 113
Рис. 4.2	МСЕ-модель областей нерегулярної геометрії ЗО (зон отворів, місцевих потовщень, зломів поверхні тощо) ..... 114

Рис. 4.3	Осьовий переріз розрахункової МСЕ-моделі ЗО енергоблоку АЕС і розташування глобальної декартової системи координат .....	115
Рис. 4.4	Схема силової взаємодії між армоканатом СПЗО, каналоутворювачем і бетоном ЗО енергоблоку АЕС .....	116
Рис. 4.5	Форми №№ 1, 2 власних коливань захисної оболонки.....	124
Рис. 4.6	Форми №№ 3, 4 власних коливань захисної оболонки.....	124
Рис. 4.7	Форми №№ 5, 10 власних коливань захисної оболонки.....	125
Рис. 4.8	Форми №№ 18, 25 власних коливань захисної оболонки.....	125
Рис. 4.9	Форми №№ 47, 70 власних коливань захисної оболонки.....	126
Рис. 4.10	Динаміка розрахункової зміни (стрибку і подальшого зниження) тиску пароповітряного середовища в гермооб'ємі енергоблоку АЕС в умовах максимальної проектної аварії.....	126
Рис. 4.11	Трикомпонентна поверхова (на висотній позначці 11.800 м ЗО) акселерограма від проектного землетрусу на проммайданчику енергоблоку АЕС.....	127
Рис. 4.12	Схема поєднання динамічних навантажень на ЗО від тиску пароповітряного середовища в РВ енергоблоку АЕС в умовах максимальної проектної аварії та від проектного землетрусу .....	128
Рис. 4.13	Деформована форма ЗО в режимі «МПА+ПЗт» для стану ЗО з максимальною інтенсивністю напружень в ГСО 195.3 МПа (момент часу 16.83 с після початку землетрусу).....	129
Рис. 4.14	Ізополя інтенсивності напружень по характерному перерізу ЗО в режимі «МПА+ПЗт» для стану ЗО з максимальною інтенсивністю напружень в ГСО 195.3 МПа (момент часу 16.83 с після початку землетрусу) .....	129
Рис. 4.15	Графік зміни концентрації водню в гермооб'ємі РВ енергоблоку АЕС в умовах ЗПА, яка розглядається.....	131
Рис. 4.16	Графік зміни тиску пароповітряного середовища в гермооб'ємі РВ енергоблоку АЕС в умовах ЗПА, яка розглядається .....	131
Рис. 4.17	Графік зростання тиску при горінні повітряно-водневої суміші в замкненому об'ємі .....	132
Рис. 4.18	Розподіл тиску в гермооб'ємі – (1) на стінці ЗО; (2) по осі симетрії РВ – на момент досягнення максимального тиску в вершині купола ЗО при миттєвому вибуху повітряно-водневої суміші в шахті реактора (згідно [166]) .....	132
Рис. 4.19	Графік зміни тиску в вершині купола ЗО при миттєвому вибуху повітряно-водневої суміші в шахті реактора (згідно [166]).....	133
Рис. 4.20	Деформована форма ЗО в режимі «ЗПА+вибух повітряно-водневої суміші в РВ» для стану ЗО з максимальною інтенсивністю напружень в ГСО 261.7 МПа (момент часу 6.83 мс після пікового рівня тиску від вибуху).....	134
Рис. 4.21	Ізополя інтенсивності напружень по характерному перерізу ЗО в режимі «ЗПА+вибух повітряно-водневої суміші в РВ» для стану ЗО з	

максимальною інтенсивністю напружень в ГСО 261.7 МПа (момент часу 6.83 мс після пікового рівня тиску від вибуху) .....	134
------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	-----

## ПЕРЕЛІК ТАБЛИЦЬ

стор.

Таблиця 1 Діючі енергоблоки АЕС України і терміни їх експлуатації (згідно [1]).....	10
Таблиця 4.1 Прийняті для розрахунків характеристики шарів стінки ЗО .....	112
Таблиця 4.2 Частоти і періоди власних коливань МСЕ-моделі ЗО .....	121

## ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ

АЕС	– атомна електрична станція
АК	– арматурний канат СПЗО
АС	– атомна станція (електрична, теплопостачання тощо)
АСНД	– автоматизована система наукових досліджень
ВВЕР	– водо-водяний енергетичний реактор
ВЯП	– відпрацьоване ядерне паливо
ГНТЦ ЯРБ	– див. скорочення «ДНТЦ ЯРБ»
ГО	– гермооб'єм
ГСО	– герметизуюче сталеве облицювання
ДНТЦ ЯРБ	– Державний науково-технічний центр з ядерної та радіаційної безпеки Держатомрегулювання України і НАН України
ЗО	– захисна оболонка
ЗПА	– запроектна аварія
КПР	– контрольно-профілактичні роботи
МАГАТЕ	– Міжнародна агенція з атомної енергії
МПА	– максимальна проектна аварія
МРЗ	– максимальний розрахунковий землетрус
МСЕ	– метод скінчених елементів
МССЕ	– моментна схема скінчених елементів
НАН	– Національна академія наук
НД	– нормативна документація
НДС	– напружено-деформований стан
ПА	– проектна аварія
ПЗт	– проектний землетрус
ПЗ	– програмне забезпечення
РВ	– реакторне відділення енергоблоку АЕС
РУ	– реакторна установка енергоблоку АЕС
САПР	– система автоматизованого проектування
СГО	– система герметичного огороження РВ енергоблоку АЕС
СЕ	– скінчений елемент
СНІП	– (рос. – строительные нормы и правила) – будівельні норми і правила
СПЗО	– система переднапруження захисної оболонки
ЯРБ	– ядерна та радіаційна безпека

## В С Т У П

**Скорочений опис досліджуваної науково-технічної проблеми.** Атомна енергетика є провідною, стратегічною галуззю України – на АЕС виробляється понад 50% електроенергії країни, і цей обсяг має стала тенденцію до зростання. На даний час в Україні (див. Рис. 1) функціонує 15 енергоблоків АЕС (з них 13 енергоблоків – з реакторами типу ВВЕР-1000 потужністю 1000 МВт, а 2 енергоблоки – з реакторами типу ВВЕР-440 потужністю 440 МВт). В той же час поточна експлуатація енергоблоків АЕС України пов’язана з певними проблемами.

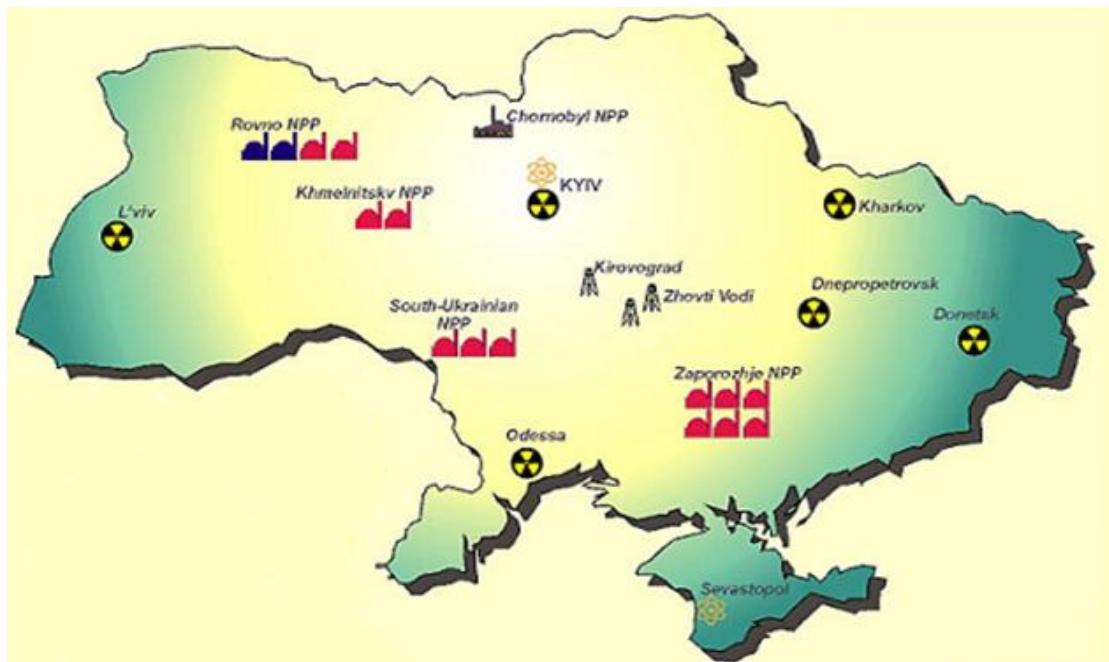


Рис. 1 Розташування в Україні об’єктів атомно-енергетичної галузі  
Умовні позначення на Рис. 1:

-  – діючі енергоблоки з РУ типа ВВЕР-1000 на Запорізькій, Рівненській, Хмельницькій, Южно-Українській АЕС;
-  – АЕС, які виводяться з експлуатації – Чорнобильська АЕС (ЧАЕС), зокрема, централізоване сховище ВЯП АЕС – в зоні відчуження ЧАЕС;
-  – дослідницькі реактори – в м. Київ, Севастополь, Харків;
-  – підприємства по видобуванню уранових руд;
-  – підприємства з утилізації радіоактивних відходів Державної корпорації «УкрДО «Радон»».

Більшість діючих енергоблоків АЕС України були введені в експлуатацію в 80-х роках ХХ-го сторіччя. Проектування ж енергоблоків відбувалось здебільшого в період 1970-1980 рр., зазвичай з застосуванням спрощених інженерних методик на підставі вимог загальнопромислових нормативних документів будівельного і технологічного профілю. Протягом терміну експлуатації енергоблоків АЕС України відбулась низка подій, які безпосередньо вплинули на збільшення уваги держави, промисловості, громадянського суспільства і наукової спільноти до питань оцінки і забезпечення безпеки енергоблоків АЕС. Це, зокрема, такі події:

- приймаючи до уваги інтенсивне будівництво нових енергоблоків АЕС в світі, а також зважаючи на наслідки ядерної аварії на Чорнобильській АЕС в 1986 р.:

- Міжнародною агенцією з ядерної енергії, а також країнами-операторами АЕС було розроблено значну кількість спеціалізованих НД з підвищеними вимогами до забезпечення ядерної та радіаційної безпеки енергоблоків АЕС на етапах їх проектування, зведення і експлуатації;
- для енергоблоків АЕС України було виконано значний обсяг досліджень щодо:

- сценаріїв виникнення і розвитку проектних і запроектних (важких) аварій в реакторних відділеннях;
- частоти виникнення, сценаріїв розвитку і фізико-механічних параметрів зовнішніх небезпек на майданчиках розташування АЕС – природних (землетрус, смерч, повінь тощо), а також техногенних (вибух, пожежа, падіння літака тощо);
- у зв'язку з наближенням до вичерпання проектного (30 років) терміну експлуатації енергоблоків АЕС України на АЕС відповідно до рішень Уряду України, які викладені в «Енергетичній стратегії України на період до 2030 року» і в «Комплексній програмі робіт щодо продовження строку експлуатації діючих енергоблоків атомних електростанцій» (див. Таблиця 1) розроблені і впроваджуються заходи з:

- обґрутування можливості подовження терміну експлуатації енергоблоків, а також

- забезпечення експлуатації енергоблоків АЕС протягом понадпроектного терміну з дотриманням сучасних вимог з безпеки, викладених в документах МАГАТЕ, а також в національних і міжнародних НД з ЯРБ.

Таблиця 1

## Діючі енергоблоки АЕС України і терміни їх експлуатації (згідно [1])

<b>АЕС</b>	<b>Е/Бл</b>	<b>Тип реактора</b>	<b>Закінчення проектного/перепризначеноого терміну експлуатації</b>
<b>ЗАЕС</b>	1	<b>ВВЕР-1000/В-320</b>	<b>23.12.2015</b>
	2	<b>ВВЕР-1000/В-320</b>	<b>19.02.2016</b>
	3	<b>ВВЕР-1000/В-320</b>	<b>05.03.2017</b>
	4	<b>ВВЕР-1000/В-320</b>	<b>04.04.2018</b>
	5	<b>ВВЕР-1000/В-320</b>	<b>27.05.2020</b>
	6	<b>ВВЕР-1000/В-320</b>	<b>21.10.2026</b>
<b>ЮУАЕС</b>	1	<b>ВВЕР-1000/В-302</b>	<b>02.12.2013/02.12.2023</b>
	2	<b>ВВЕР-1000/В-338</b>	<b>12.05.2015/31.12.2025</b>
	3	<b>ВВЕР-1000/В-320</b>	<b>10.02.2020</b>
<b>РАЕС</b>	1	<b>ВВЕР-440/В-213</b>	<b>22.12.2010/22.12.2030</b>
	2	<b>ВВЕР-440/В-213</b>	<b>22.12.2011/22.12.2031</b>
	3	<b>ВВЕР-1000/В-320</b>	<b>11.12.2017</b>
	4	<b>ВВЕР-1000/В-320</b>	<b>07.06.2035</b>
<b>ХАЕС</b>	1	<b>ВВЕР-1000/В-320</b>	<b>13.12.2018</b>
	2	<b>ВВЕР-1000/В-320</b>	<b>07.09.2035</b>

Зважаючи на вищевикладене, для конструкцій низки важливих для безпеки систем і компонентів енергоблоків АЕС України залишається актуальною проблема підтвердження їх працездатності (міцності, цілісності, геометричної стабільності тощо) в нормальних і аварійних умовах експлуатації з урахуванням:

- вимог чинних НД з ЯРБ, які зазвичай є більш жорсткими, ніж вимоги загальнопромислових НД, які застосовувались на етапі первинного проектування;
- впливу аварійних факторів в РВ (тиску, температури тощо) в умовах проектних і запроектних аварій;
- екстремальних природних і техногенних явищ (подій) на майданчику АЕС;
- обґрутованих реалістичних сценаріїв реалізації в часі і просторі найбільш несприятливих конфігурацій розподілу інтенсивностей впливу внутрішніх та/або зовнішніх аварійних (екстремальних) факторів.

На більшості енергоблоків АЕС України з реакторними установками ВВЕР-1000 РВ розташовані під одинарними залізобетонними попередньо напруженими захисними оболонками з циліндричною стінкою і сферичним куполом (див. Рис. 2). По внутрішній поверхні ЗО (див. Рис. 3) влаштоване сталеве герметизуюче облицювання. ЗО енергоблоку АЕС є складовою системи глибокоешелонованого захисту реакторної установки, ізоляє її від зовнішніх природних і техногенних впливів і забезпечує локалізацію радіоактивних речовин в підоболонковому просторі – гермооб’ємі – при потенційно можливих аваріях в РВ, спричинених дією внутрішніх або зовнішніх аварійних чинників (див. Рис. 4).

**Актуальність дослідження.** Оцінка проектного і прогнозованого технічного стану і працездатності ЗО:

- на етапі проектування – здійснювалась, як зазначено вище, шляхом застосування спрощених розрахункових інженерних методик згідно вимогам загальновбудівельних НД 70-их років ХХ-го сторіччя;
- на етапі експлуатації – здійснюється методами візуального і інструментального (неруйнівного) контролю з використанням переносних технічних засобів, а також щорічними випробуваннями герметичності ЗО шляхом незначного підвищення тиску в гермооб’ємі.

Попри доведену практичним досвідом надійність технологій проектних оцінок і експлуатаційного контролю, основним недоліком зазначених методів є те, що:

- застосовані спрощені розрахункові інженерні методики принципово не дають змоги коректно змоделювати термомеханічну та/або динамічну поведінку конструкцій систем і елементів енергоблоку АЕС в складних умовах потенційно можливих проектних і запроектних аварій, а також при дії зовнішніх екстремальних впливів;
- застосування методів візуального і інструментального (неруйнівного) контролю конструкцій можливо виключно в період планово-попереджуvalьних ремонтів (в режимі реакторної установки «холодний останов») і є неможливим навіть при нормальній експлуатації РУ (в режимі «робота реактора на потужності»), не говорячи про фіксацію наслідків динамічних навантажень на ЗО в аварійних умовах або в умовах прояву екстремальних зовнішніх впливів.

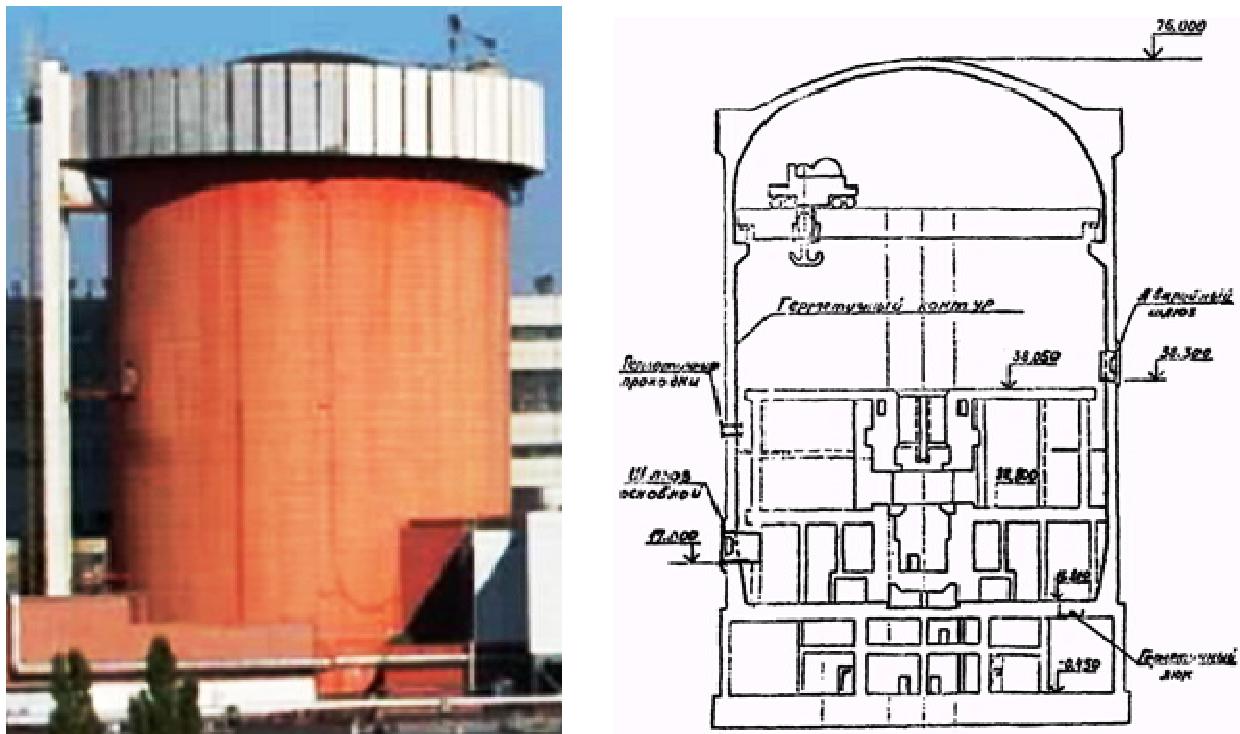


Рис. 2 Зовнішній вигляд і осьовий переріз РВ енергоблоку АЕС

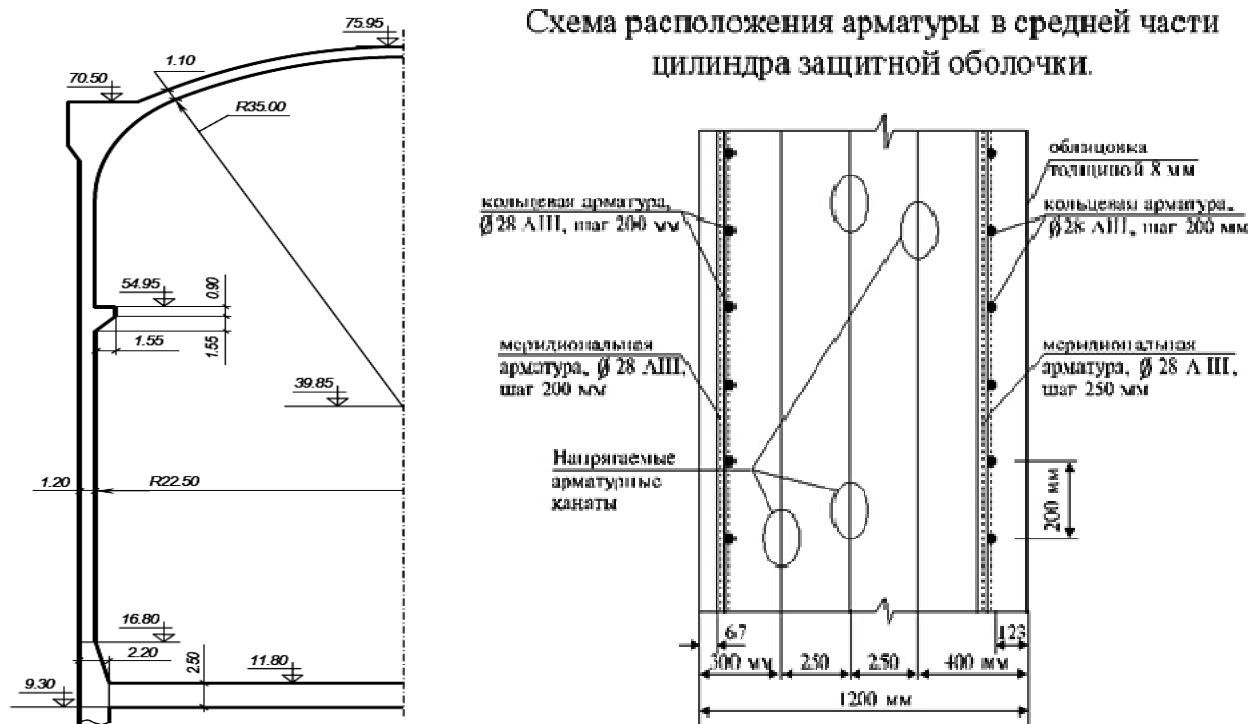


Рис. 3 Осьовий перетин і структура стінки ЗО енергоблоку АЕС.  
Основні розміри конструкції ЗО.

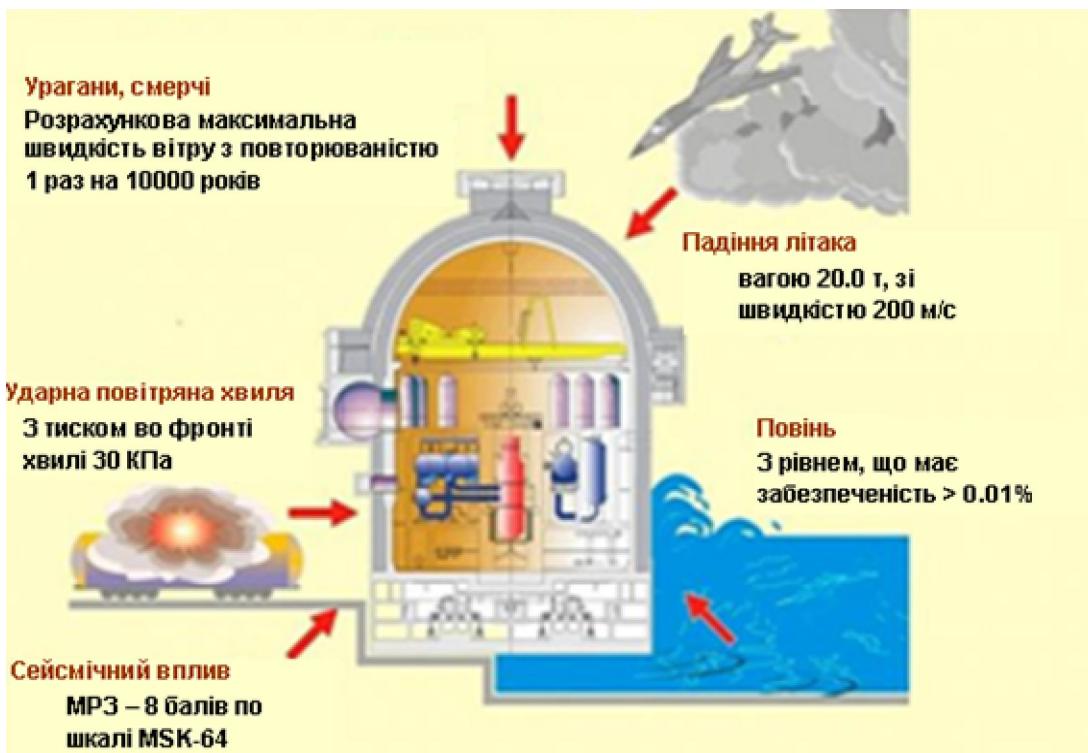


Рис. 4 Зовнішні природні і техногенні екстремальні (потенційно аварійні) впливи на ЗО, які враховуються в проекті АЕС

Така обмеженість нормативно регламентованих проектних і експлуатаційних методів оцінки технічного стану конструкцій систем і елементів енергоблоків АЕС є важливою мотивацією для створення інструментарію математичного моделювання і оцінки технічного стану ЗО в процесі їх нормальної експлуатації і в аварійних умовах, а також для здійснення відповідних досліджень ЗО.

Зважаючи на зазначені аспекти, які обумовили необхідність підтвердження працездатності ЗО енергоблоків АЕС, тобто відповідність ЗО вимогам чинних національних і міжнародних НД з ЯРБ, з 1990 р. в Україні і Росії було виконано, переважно з використанням методу скінчених елементів, низку розрахункових досліджень НДС і працездатності ЗО. Але аналіз змісту зазначених досліджень, а саме – застосованих розрахункових МСЕ-моделей ЗО (див. Рис. 5 ... Рис. 6) – свідчить про притаманні цим моделям суттєві некоректності, які однозначно мали призвести до отримання нереалістичних (недостовірних) значень параметрів НДС та до необґрунтованих висновків щодо працездатності ЗО. До зазначених невідповідностей слід віднести наступне:

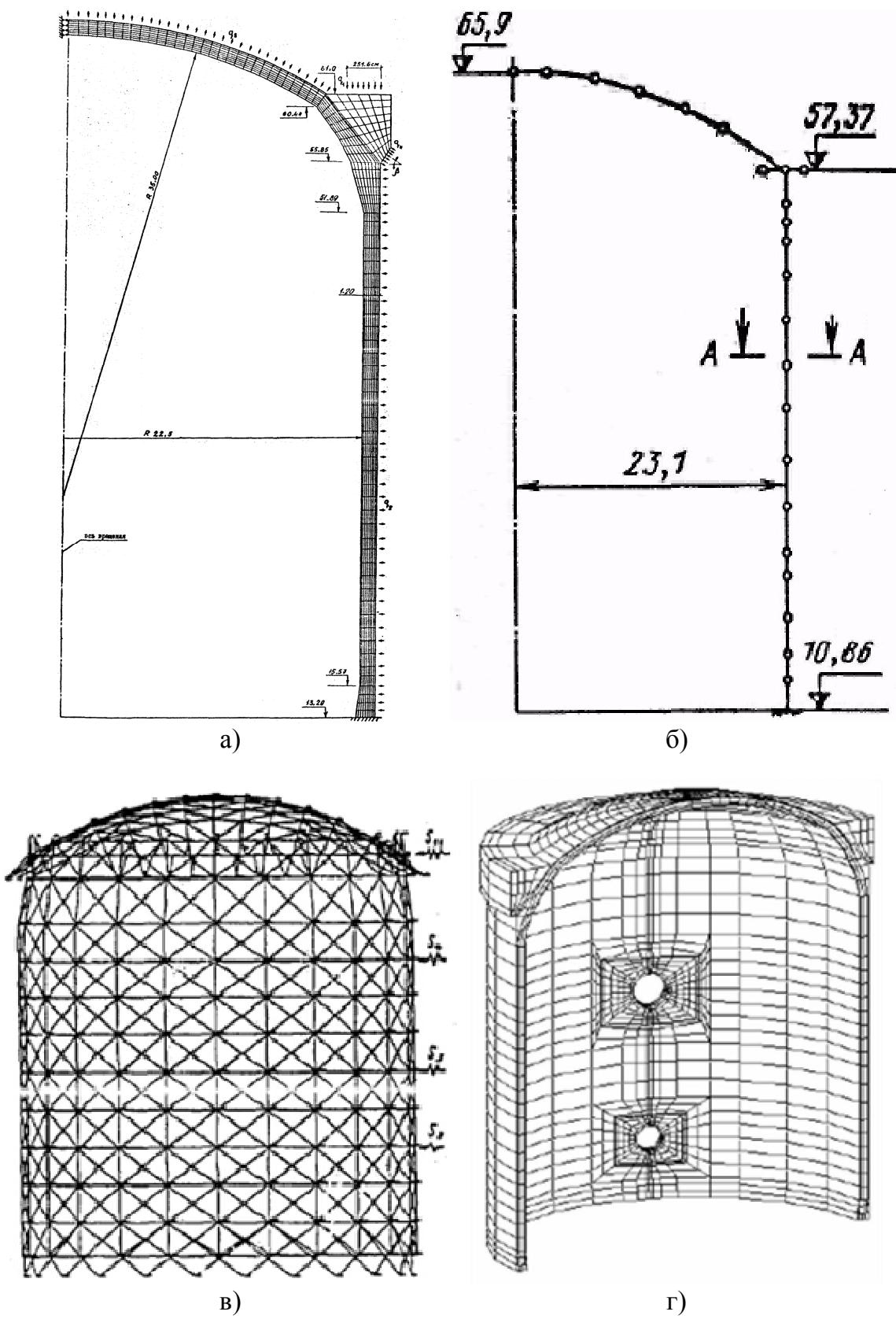


Рис. 5 Розрахункові МСЕ-моделі ЗО, застосовані в дослідженнях [2-5]

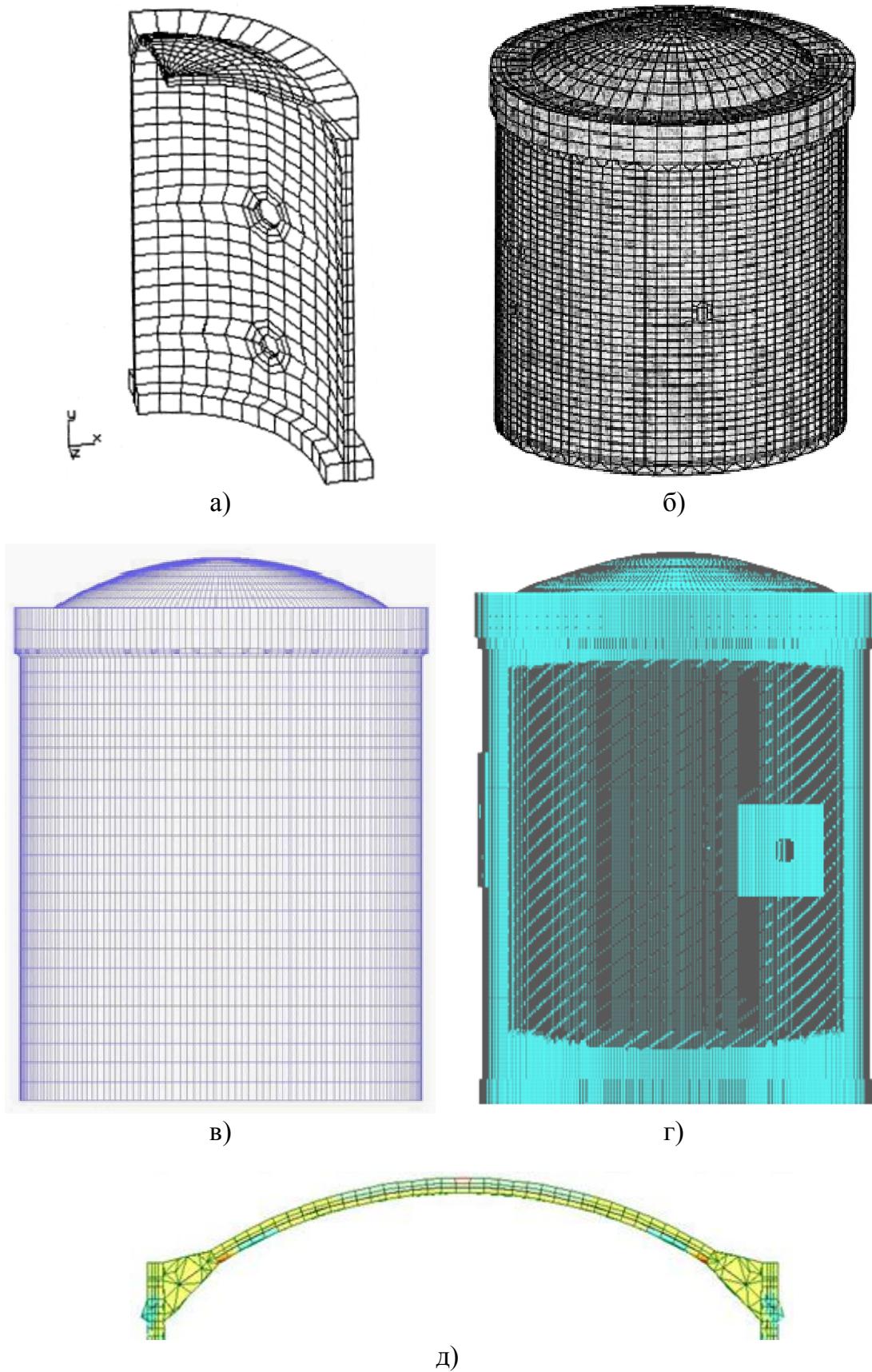


Рис. 6 Розрахункові МСЕ-моделі ЗО, застосовані в дослідженнях  
[6-10]

- неврахування локальних особливостей геометрії ЗО (отворів для влаштування люків і технологічних проходок, локальних потовщень ЗО в зонах, прилеглих до отворів, опорної плити тощо, зламів поверхні ЗО тощо);
- некоректне моделювання функції розподілу зусиль переднапруження (тиску від армоканатів СПЗО) на конструкцію ЗО або неврахування такого впливу;
- застосування необґрунтованих функцій зміни по поверхні ЗО і в часі інтенсивності внутрішнього тиску пароповітряного середовища в гермооб'ємі при проектних і запроектних аваріях, а також тиску повітряної хвилі від вибуху повітряно-водневої суміші в ГО в умовах ЗПА;
- застосування необґрунтованих (не підтверджених відповідними інженерними довишукуваннями) функцій зміни в часі інтенсивності сейсмічного впливу (трикомпонентних акселерограм);
- застосування таких, що не відповідають чинним НД з ЯРБ, критеріїв працездатності ЗО в умовах МПА і ЗПА;
- застосування осесиметричних або циклічно-симетричних МСЕ-моделей для розрахунку НДС споруди (ЗО), який не притаманні ознаки зазначененої симетрії;
- застосування одношарової схеми моделювання стінки ЗО, яка в реальності має суттєво неоднорідну структуру по товщині;
- застосування скінчених елементів виродженої форми, або однотипних СЕ, розміри яких відрізняються в кілька разів, що призводить до нереалістичних розрахункових функцій зміни переміщень і напружень в матеріалі ЗО;
- застосування при МСЕ-моделюванні ЗО нереалістичних граничних умов, зокрема використання абсолютно жорсткого спирання ЗО на опорну плиту, яке виключає певну піддатливість опірного з'єднання, і призводить до надмірного збільшення розрахункових напружень в зазначеній зоні конструкції ЗО;
- відсутність досліджень НДС і динамічної поведінки ЗО за методологією прямого динамічного аналізу, яка забезпечує отримання реалістичної картини розвитку еволюційного процесу руху і зміни параметрів НДС під час вимушених коливань протягом терміну дії динамічного навантаження, а також під час вільних коливань після завершення дії динамічного навантаження.
- відсутність інформації про верифікацію розрахункових МСЕ-моделей і

обґрунтувань достовірності результатів розрахунків.

Стосовно деяких з зазначених недоліків, в роботі [11] надано наступне пояснення – «... была решена задача об исследованию НДС ЗО реакторного отделения АЭС при падении на нее самолета под углом 45°. Выполнение расчета оболочки в случае воздействия на нее только ударной нагрузки (за исключением собственного веса и предварительного напряжения) в известной степени противоречит физически возможной картине состояния ЗО. Однако в целях возможности более детального анализа влияния отдельных факторов на общее напряженное состояние конструкции приведены эти промежуточные расчеты».

Таким чином, залишається необхідність вирішення шляхом коректних розрахунків НДС проблеми підтвердження безпеки енергоблоків АЕС в частині збереження працездатності ЗО в умовах динамічних впливів при МПА і ЗПА.

#### **Аналіз літератури (огляд досліджень по проблемі, що розглядається).**

Результати аналізу науково-технічної літератури з досліджуваної проблеми свідчать, що існує велика кількість публікацій, присвячених вивченю динамічної поведінки оболонкових конструкцій при стаціонарних впливах. Однією з основоположних робіт в цій області є монографія В.В.Болотіна [12]. В подальшому найбільш послідовно методи вивчення складних режимів коливань пластин і оболонок були викладені в монографії В.И.Гуляєва, В.А.Баженова, Е.А.Гоцуляка, Е.С.Дехтярюка, П.П.Лізунова [13].

Питання розвитку методів вирішення задач нестаціонарної динаміки оболонкових конструкцій розглянуті в монографіях А.С.Вольміра, Б.А.Куранова, А.Т.Турбаївського [14], Ш.У.Галієва [15-19], Р.Клафа [20], В.Новацького [21], а також в роботах В.З.Власова, О.М.Гузя, Я.М.Григоренка, В.Д.Кубенка, В.А.Баженова, Є.С.Дехтярюка, Є.О.Гоцуляка, В.І.Гуляєва, В.В.Гайдайчука, В.Н.Кислоокого, А.Д.Легостаєва, Т.І.Матченка, О.С.Сахарова, М.О.Солов'я, В.К.Цихановського, О.Л.Козака, В.Г.Карнаухова, М.А.Льгамова, В.І.Пожуєва, О.О.Расказова, Є.Г.Янютіна, A.K Noor, N.J Pagano [22, 23, 24, 25, 56, 63, 66, 80-84, 87-90] та інших дослідників. Результати досліджень динамічної поведінки оболонкових конструкцій при стаціонарних і нестаціонарних впливах розглянуті також в монографіях В.В.Болотіна [22-28], статтях Е.С.Дехтярюка, Г.В.Ісаханова,

П.Г.Мельника-Мельникова [29-41] тощо. Розвитку теорії оболонок для випадку скінчених переміщень присвячені праці О.В.Александрова, М.О.Алумяэ, С.О.Амбарцумяна, В.З.Власова, А.С.Вольміра, Й.І.Воровича, О.Л.Гольденвейзера, О.В.Гондляха, Е.І.Григоляка, Ц.Н.Кана, Н.О.Кільчевського, А.І.Лур'є, А.Лява, В.В.Новожилова, Е.Рейснера, С.П.Тимошенка, В.І.Феодосьєва [32, 33, 34, 35, 36, 37, 143] та інших. Але, слід зазначити, що побудова математичних розрахункових моделей для багатьох реальних тонкостінних елементів будівельних споруд і технологічного обладнання на основі класичних аналітичних підходів є практично неможливою (або може бути здійснена лише для обмеженої групи оболонкових конструкцій або їх локальних елементів, яким притаманні близька до ідеальної геометрична форма (конус, циліндр, сфера тощо) і прості для моделювання види навантажень (власна вага, нормальні тиск тощо)). В той же час сучасна теорія пластин и оболонок залишається математичною базою для побудови чисельних методів розрахунку реальних тонкостінних елементів, які застосовуються в сучасному будівництві та інших галузях техніки.

Для розрахунку НДС і динамічної поведінки ЗО в принципі можливо використовувати теорію підкріплених шаруватих оболонок або теорію оболонок на пружній основі, викладення яких наведено в роботах І.Я.Аміро, О.Я.Григоренка, Ю.П.Жигалко, В.О.Заруцького, О.І.Лиходіда, П.З.Лугового, Л.І.Маневича, В.Ф.Мейша [42, 44], N.J Pagano тощо, а також імовірнісні підходи в проектуванні [45, 178]. Але розроблені на основі зазначених теорій методи аналізу не є цілком прийнятними (тобто, зручними, алгоритмічними і, як наслідок, достатньо ефективними) засобами для практичного виконання досліджень НДС і динамічної поведінки ЗО енергоблоку АЕС – складної комбінованої оболонкової конструкції, якій притаманна низка локальних нерегулярностей геометричної форми (отвори, місцеві потовщення, злами поверхні тощо), а також конструктивних особливостей (зокрема, таких як неоднорідність матеріалів, що складають споруду).

Відповідно, внаслідок вищезазначеної системної обмеженості класичних аналітичних підходів, основний обсяг результатів досліджень НДС і динамічної поведінки реальних оболонкових конструкцій був отриманий чисельними методами, серед яких найширший розвиток і застосування набули метод скінчених

різностей, варіаційно-різносний метод, метод криволінійних сіток, метод скінчених елементів [46, 47].

Зважаючи на вищевикладене, для розрахунку НДС і динаміки ЗО є актуальним розвиток існуючих і створення нових ефективних схем апробованих обчислювальних методів, зокрема методу скінчених елементів, з подальшою їх реалізацією у вигляді ефективних проблемно- і об'єктно-орієнтованих програмних засобів для ЕОМ.

Обчислювальні технології механіко-міцнісного аналізу інженерних конструкцій і систем, реалізовані у вигляді спеціалізованих програмних засобів [46-51], надають можливість здійснювати розрахунки НДС і динамічної поведінки, зокрема, тонкостінних елементів споруд і технологічного обладнання таких, що мають складну геометрію, різноманітні граничні умови і навантажені довільною конфігурацією будь-яких зовнішніх впливів. Але застосування обчислювальних методів для аналізу динамічної поведінки реальних оболонок складної форми призводить до необхідності дослідження еволюційних процесів шляхом багаторазового розв'язання систем рівнянь великої розмірності (з кількістю невідомих/рівнянь, яка складає десятки і, навіть, сотні тисяч).

В ряді робіт, наприклад [52], побудова рішень лінійних і нелінійних нестационарних задач динаміки оболонкових конструкцій здійснюється шляхом чисельного інтегрування (на основі одного з відомих обчислювальних алгоритмів [14, 53, 54]) вихідних рівнянь руху. Але, слід зазначити, що дискретні моделі багатьох реальних об'єктів містять десятки, а іноді і сотні тисяч рівнянь і невідомих. Побудова рішень вихідних систем диференційних рівнянь такої розмірності з урахуванням необхідності багаторазового розгляду задачі внаслідок невизначеності параметрів навантаження і/або необхідності розгляду великої кількості варіантів навантажень є достатньо трудомісткою задачею, навіть при використанні сучасних потужних ЕОМ.

Аналізуючи «стримуючі фактори» на шляху широкого впровадження чисельного моделювання при розв'язанні задач оцінки НДС і несучої спроможності конструкцій при динамічних впливах, можна визначити два основних ресурсних обмеження: а) по обсягу доступної оперативної пам'яті ЕОМ;

б) по часу (розв'язанням задачі на ЕОМ).

Найбільш часто для здолання труднощів, обумовлених обсягом оперативної пам'яті ЕОМ («а»), застосовується метод редукції базису [20, 46, 55-99, 179-182 та ін.], хоча слід зазначити, що в певних випадках згадана проблема може бути подолана шляхом застосування для розв'язання відповідних систем рівнянь градієнтних методів.

Основний принцип створення ефективних методик моделювання статичної і динамічної поведінки конструкцій, здебільшого полягає в тому, щоб врахувати в математичній моделі основні (значущі) властивості реального об'єкта («ефективні ступені свободи») і виключити з розгляду фактори або ступені свободи, які незначно впливають на поведінку системи, але суттєво збільшують трудомісткість та/або складність обчислювального процесу.

В зв'язку з цим велике значення становлять методи пониження розмірності (редукції) вихідної системи рівнянь. До їх складу слід віднести метод структурного сплінінга [100], суперелементів (підконструкцій) [101-105], статичної конденсації [106-108], базисних векторів [58-62, 64, 39, 97-99], причому останній з перелічених методів не пов'язаний із способом дискретизації вихідної моделі і є найбільш загальним із згаданих підходів.

Слід зазначити, що необхідність застосування процедури зниження розмірності вихідної системи розв'язуючих рівнянь може бути обумовлена як неможливістю (внаслідок обмеженої потужності ЕОМ) отримати в визначені терміни рішення для повної (вихідної) системи рівнянь, так і недоцільністю врахування складових НДС, внесок яких є практично не впливає на підсумковий результат розв'язання задачі.

**Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.** Дисертаційна робота виконана у відповідності до програм і планів наукових робіт Інституту механіки ім. С.П.Тимошенка НАН України за наступними науковими темами:

- «Коливання та стійкість гладких та дискретно підкріплених циліндричних оболонок при статичних та імпульсних навантаженнях» (шифр № 3 1.3.1.392-14, № ДР 0114U0021642014 – 2015 рр.) та
- «Дослідження механічної поведінки неоднорідних анізотропних елементів

сучасних конструкцій складної структури за допомогою нових підходів на основі різних моделей» (шифр № 1.3.1.382-12, № ДР 0102U000249 – 2016 pp.).

**Мета і задачі дослідження.** Метою роботи є аналіз НДС і динамічної поведінки ЗО, а також оцінка працездатності споруди при нестационарних динамічних навантаженнях в умовах потенційно можливих проектних та/або запроектних аварій. Досягнення мети дослідження здійснюється шляхом вирішення наступних задач:

- аналіз існуючих проблем оцінки працездатності ЗО енергоблоків АЕС України, що експлуатуються, при екстремальних природних і технологічних динамічних впливах в аварійних умовах;
- визначення нормативно узгоджених критеріїв працездатності ЗО (як локалізуючої системи безпеки) при екстремальних динамічних впливах в умовах максимальної проектної і запроектних аварій;
- розробка на основі теоретично обґрунтованої і практично апробованої схеми МСЕ методології розрахункового моделювання НДС і динамічної поведінки ЗО при екстремальних динамічних впливах в умовах МПА і ЗПА;
- розробка програмного засобу, який реалізує розроблену методологію моделювання НДС і динамічної поведінки ЗО при екстремальних динамічних впливах в умовах МПА і ЗПА;
- розробка розрахункової МСЕ-моделі ЗО, яка враховує її реальні (проектні) геометричні розміри (зокрема, розташування і розміри технологічних отворів (люків/шлюзів, проходок), потовщень конструкції в зонах отворів, анкерного карнизу, підкранової консолі, з'єднання циліндричної частини ЗО з опорною плитою), фізико-механічні властивості конструкційних матеріалів, граничні і початкові умови тощо;
- розробка і програмна реалізація математичних моделей (функцій) розподілу в просторі (по поверхні/об’єму ЗО) та/або в часі розрахункових силових впливів на ЗО – власної ваги конструкцій і технологічного обладнання, зусиль від переднапруження з врахуванням ефекту тертя між армоканатами (АК) і каналоутворювачами, стрибку аварійного тиску пароповітряного середовища в ГО, впливу проектного землетрусу при МПА і тиску повітряної ударної хвилі від

вибуху повітряно-водневої суміші в ГО при ЗПА тощо;

- розрахункове моделювання НДС і динамічної поведінки ЗО з застосуванням методу прямого динамічного аналізу і редукційованої МСЕ-моделі великорозмірної відповідальної споруди (ЗО) для спільної дії аварійних технологічних (тиск, вибух) і екстремальних природних (землетрус) динамічних впливів;
- розробка висновків щодо працездатності (збереження локалізуючої функції) ЗО при екстремальних динамічних впливах в умовах МПА і ЗПА, а також розробка рекомендацій щодо забезпечення працездатності ЗО протягом проектного і понадпроектного терміну експлуатації енергоблоків АЕС.

**Об'єктом досліджень** є одинарні ЗО енергоблоків АЕС, які знаходяться під дією власної ваги, зусиль переднапруження, аварійного тиску внутрішнього пароповітряного середовища в ГО, а також динамічних навантажень (проектного землетрусу, впливу тиску повітряної ударної хвилі від вибуху повітряно-водневої суміші в ГО);

**Предметом наукового дослідження** є визначення НДС, а також вимушених і вільних коливань ЗО при дії на ЗО власної ваги, зусиль переднапруження, аварійного тиску внутрішнього пароповітряного середовища в ГО, а також динамічних навантажень (проектного землетрусу, впливу тиску повітряної ударної хвилі від вибуху повітряно-водневої суміші в ГО).

**Методи досліджень.** Враховуючи вищезазначені особливості конструкції ЗО і характеристики проектних впливів на споруду для аналізу НДС і динамічної поведінки будівлі в аварійних умовах був обраний метод скінчених елементів, якому притаманні інженерна наочність, можливість необхідного ступеню деталізації розрахункових моделей, алгоритмічність тощо. Моделювання досліджуваного об'єкту – НДС і динамічної поведінки ЗО – здійснюється за допомогою апробованої модифікації методу скінчених елементів, а саме – моментної схеми скінчених елементів. Дослідження НДС ЗО здійснюється також з застосуванням принципу суперпозиції стосовно спільній дії власної ваги, зусиль переднапруження, тиску внутрішнього аварійного пароповітряного середовища в ГО, а також динамічних навантажень (проектного землетрусу, впливу повітряної

ударної хвилі від вибуху повітряно-водневої суміші в ГО). В основу практичного застосування розробленої методології теоретичного дослідження НДС і коливань ЗО покладена коректна реалістична (така, що відповідає фактично реалізованому проекту ЗО) розрахункова МСЕ-модель споруди. В якості ознаки втрати спорудою працездатності обрано досягнення інтенсивністю напружень в матеріалі ГСО межі плинності (критерій Мізеса).

Вищеозначені методологія теоретичного дослідження НДС і коливань ЗО, обчислювальні алгоритми, МСЕ-модель ЗО, а також виконані механіко-міцнісні розрахунки НДС і динамічної поведінки ЗО були інструментально реалізовані за допомогою розробленого і модифікованого автором цієї роботи програмного засобу «ДИПРОС» («Динамика и прочность оболочечных систем») [171].

**Наукова новизна отриманих результатів** полягає в тому, що була наведена і розглянута уточнена постановка задачі щодо динамічної поведінки ЗО при дії екстремальних динамічних впливах в аварійних умовах, зокрема:

- виконано аналіз існуючих проблем оцінки працездатності ЗО енергоблоків АЕС України, що експлуатуються, при екстремальних природних і технологічних динамічних впливах в аварійних умовах;
- визначені нормативно узгоджені критерії працездатності ЗО (як локалізуючої системи безпеки) при екстремальних динамічних впливах в умовах максимальної проектної і запроектних аварій;
- розроблено – на основі теоретично обґрунтованої і практично апробованої схеми МСЕ – методологію розрахункового моделювання НДС і динамічної поведінки ЗО при екстремальних динамічних впливах в умовах МПА і ЗПА, зокрема математичний апарат для моделювання НДС і динамічної поведінки тонкостінних конструкцій на підставі застосування комбінованих (змішаних) редукційованих МСЕ-моделей, утворених з використанням притаманних вихідній МСЕ-моделі форм власних коливань;
- створено програмний засіб «ДИПРОС», який реалізує розроблену методологію моделювання НДС і динамічної поведінки ЗО при екстремальних динамічних впливах в умовах МПА і ЗПА;
- розроблено і програмно реалізовано деталізовану, максимально

геометрично і структурно наближену до реальної споруди (порівняно з попередніми відомими проектними і дослідницькими розробками) розрахункову МСЕ-модель залізобетонної споруди ЗО, яка враховує її проектні (фактичні) конструктивні особливості та геометричні розміри (зокрема, розміри технологічних отворів – люків/шлюзів, проходок, потовщень конструкцій в зонах отворів, анкерного карнизу, підкранової консолі, з'єднання циліндричної частини ЗО з опорною плитою), фізико-механічні властивості конструкційних матеріалів, граничні і початкові умови тощо;

- розроблено і програмно реалізовано математичні моделі (функції) розподілу в просторі (по поверхні/об’єму ЗО) та/або в часі розрахункових силових навантажень на ЗО – власної ваги конструкцій і технологічного обладнання, зусиль переднапруження з врахуванням узагальненого коефіцієнта тертя між армоканатами і каналоутворювачами, стрибку аварійного тиску пароповітряного середовища в ГО, впливу проектного землетрусу при МПА і повітряної ударної хвилі від вибуху повітряно-водневої суміші в ГО при ЗПА тощо;
- вперше виконано розрахункове моделювання НДС і динамічної поведінки ЗО з застосуванням методу прямого динамічного аналізу і редукційованої МСЕ-моделі великорозмірної відповідальної споруди (ЗО) для спільної дії аварійних технологічних (тиск, вибух) і екстремальних природних (землетрус) динамічних впливів;
- вперше досліджено (враховано) вплив на НДС і коливання ЗО вторинних (відбитих) вибухових хвиль і хвиль від стрибка тиску (проаналізовано процес «розкачування» споруди).

**Достовірність отриманих в роботі результатів** – результатів розрахунків НДС і динамічної поведінки ЗО забезпечується:

- теоретичним обґрунтуванням збігу застосованої схеми МСЕ;
- точним і детальним моделюванням геометрії і внутрішньої структури конструкцій ЗО, коректним (реалістичним) врахуванням фізико-механічних характеристик конструкційних матеріалів;
- застосуванням МСЕ-моделі із оптимальним співвідношенням розмірів скінчених елементів, за яких забезпечується найкраща апроксимація параметрів НДС функціями напружень і деформацій;

- обґрунтуванням оптимальності застосованої МСЕ-мережі обчислювальними експериментами;
- використанням шагу інтегрування рівнянь руху, який забезпечує стабільність обчислювального процесу і збіг результатів розрахунку;
- перевіркою практичного збігу обчислювального процесу здійсненням серії контрольних розрахунків;
- верифікацією розробленої методики і розрахункової МСЕ-моделі шляхом порівняння результатів розрахунків ЗО з тестовими задачами, що мають аналітичні рішення, з результатами розрахунків іншими (альтернативними) програмними засобами, з результатами натурних спостережень за спорудою ЗО при інтегральних передексплуатаційних випробуваннях ЗО на міцність.

**Практичне значення одержаних результатів.** Теоретична цінність отриманих у роботі результатів полягає в тому, що розроблені математична модель, алгоритми та програмне забезпечення можуть бути застосовані для аналізу НДС і динамічної поведінки як ЗО розглянутого проекту, так і ЗО інших проектів (конструкцій) з визначенням їх потенційної працездатності. Використання розроблених алгоритмів МСЕ дозволяє здійснювати розрахунки з метою:

- оцінки дотримання меж міцності та/або несучої спроможності елементів конструкцій;
- оцінки меж застосовності більш простих теорій і спрощених інженерних підходів;
- проектування ефективних багатошарових оболонкових конструкцій, здатних сприймати технологічні та природні впливи екстремальної інтенсивності, без здійснення надмірно витратних пошукових експериментальних та натурних досліджень.

Практичне значення отриманих у роботі результатів полягає в тому, що

- запропоновані підходи до розв'язання реальних задач динаміки при нестационарних навантаженнях попередньо напружених ЗО складної геометрії (утворених циліндричною стінкою з технологічними отворами і сферичним куполом), а також
- розроблені на основі МСЕ методологія, алгоритми і програмний засіб для

розрахункового розв'язання зазначених задач;

можуть бути застосовані в науково-дослідних та проектно-конструкторських організаціях при розгляді відповідних прикладних задач – для аналізу працездатності проектів нових та/або оцінці технічного стану і працездатності існуючих великорозмірних оболонкових конструкцій і споруд – зокрема з метою розробки інженерних рішень, спрямованих на зменшення імовірності виникнення і мінімізацію негативних наслідків потенційно можливих аварійних ситуацій. Зазначене практичне значення результатів роботи підтверджується документами про їх впровадження (докладніше див. «Додаток А», «Додаток Б»).

**Особистий внесок здобувача.** Автором визначені мета і задачі дослідження, сформульовані наукові положення дисертації: розроблена і практично реалізована методологія досліджень і розв'язані задачі моделювання НДС і коливань ЗО при аварійних навантаженнях. З допомогою розробленого і вдосконаленого автором (відповідно до задач роботи) програмного засобу «ДИПРОС», здійснено чисельне моделювання конструкцій ЗО АЕС при короткочасних навантаженнях [109, 110, 115], розглянуті задачі з визначення сейсмостійкості споруд АЕС [111, 112, 113, 116, 117, 118]; також розглянуті задачі з моделювання динамічної поведінки, аналізу НДС та оцінки працездатності (збереження локалізуючої функції) ЗО в умовах МПА і проектного землетрусу, а також в умовах ЗПА і вибуху повітряно-водневої суміші в РВ; для випадку вибуху повітряно-водневої суміші у РВ; реалізована ідея врахування взаємодії первинної та відбитої повітряних ударних вибухових хвиль.

**Апробація результатів дисертації.** Основні результати дисертаційної роботи доповідалися частково і повністю на семінарах відділу будівельної механіки тонкостінних конструкцій Інституту механіки ім. С.П. Тимошенка НАН України; повністю робота доповідалась на науковому семінарі за напрямком «Механіка оболонкових систем» при Інституті механіки ім. С.П. Тимошенка НАН України. Частково матеріали дисертації доповідалися на міжнародних конференціях.

**Публікації.** За результатами дисертації опубліковано 18 робіт, зокрема, 6 статей у науковометричних фахових виданнях [109-114], 5 статей у фахових журналах і збірках України [115-119], 7 робіт у збірниках матеріалів і праць

міжнародних і республіканської наукових конференцій [120, 121, 183-187].

**Структура та обсяг роботи.** Дисертація складається з вступу, чотирьох розділів, висновків, переліку використаних джерел з 187 найменувань на 20 сторінках, містить 40 рисунків на 33 сторінках, 3 таблиці на 5 сторінках, 2 додатки на 11 сторінках. Повний обсяг дисертаційної роботи становить 172 сторінки.

У «Вступі» за результатами аналізу літературних джерел визначена мета роботи і викладена постановка задачі.

В розділі 1 наведено опис конструкції і умов експлуатації споруди ЗО енергоблоку АЕС, а також огляд стану питання щодо досвіду досліджень НДС і динаміки ЗО АЕС при короткочасних навантаженнях.

В розділі 2 викладені основні реалізовані в роботі положення механіки твердого деформівного тіла і методу скінчених елементів, а також опис обчислювальних алгоритмів розв'язання рівнянь динаміки оболонкових конструкцій, застосованих для математичного моделювання НДС і динамічної поведінки ЗО.

В розділі 3 надана інформація щодо програмної реалізації основних положень механіки твердого деформівного тіла і методу скінчених елементів, а також обчислювальних алгоритмів розв'язання рівнянь динаміки оболонкових конструкцій в складі розробленого автором програмного засобу «ДИПРОС».

В розділі 4 наведені результати дослідження НДС і динамічної поведінки ЗО АЕС при короткочасних навантаженнях в умовах проектної і запроектної аварії. Також надані відомості щодо верифікації розробленої МСЕ-моделі і обчислювальних алгоритмів, а також інформація щодо впровадження результатів розрахунків.

В розділі «Висновки» викладені основні результати дисертації і надані рекомендації щодо їх впровадження.

В розділах «Додаток А», «Додаток Б» наведені копії документів щодо впровадження результатів дисертаційної роботи.

Автор висловлює щиру подяку своєму науковому керівникові доктору технічних наук, професору, Заслуженому діячу науки і техніки України П.З.Луговому за постійну допомогу та надані корисні поради щодо написання дисертаційної роботи.

## РОЗДІЛ 1 ОСОБЛИВОСТІ КОНСТРУКЦІЇ І УМОВ ЕКСПЛУАТАЦІЇ ЗАХИСНОЇ ОБОЛОНКИ ЕНЕРГОБЛОКУ АЕС

### **1.1 Конструкція і умови експлуатації ЗО енергоблоку АЕС**

Захисні оболонки реакторних відділень енергоблоків АЕС є компонентами системи глибокоешелонированного захисту [122] реакторної установки, ізолюють РУ від зовнішніх природних і техногенних впливів, а також забезпечують локалізацію радіоактивних речовин в підоболонковому просторі при потенційно можливих аваріях в РВ. ЗО являє собою комбіновану тонкостінну конструкцію, утворену циліндричною (вертикальні стени завтовшки 1.2 м) і сферичною (покриття-купол завтовшки 1.1 м) оболонками, які мають узагальнено двухшарову структуру – зовнішній шар попередньо напруженого залізобетону і внутрішній шар металу – герметизуюче сталеве облицювання завтовшки 8 мм.

Внутрішній діаметр циліндричної частини ЗО (див. Рис. 2, Рис. 3) складає 45.00 м, внутрішній радіус сферичного купола – 35.60 м. Циліндрична частина споруди ЗО, яка розглядається, на висотній позначці 11.80 м спирається на потужну залізобетонну плиту-перекриття завтовшки 2.5 м. Найвища точка зовнішньої поверхні купола (полюс) має позначку 75.95 м.

Зона сполучення циліндра і купола нижче позначки 70.50 м посилає жорстким залізобетонним кільцевим карнизом, на якому розташовані анкерні пристрої арматурних канатів купольної і циліндричної частин системи попереднього напруження (переднапруження) ЗО. Анкерні пристрої АК циліндричної частини споруди розташовані також в нижній частині опорної плити ЗО на позначці 9.30 м.

В циліндричній частині ЗО нижче анкерного карнизу на позначці 54.95 м знаходиться верх кільцевої консолі, по якій укладена підкранова рейка мостового крану кругової дії реакторного відділення.

В цілому геометрична форма споруди являє собою геометричну форму, близьку до тіла обертання.

СПЗО енергоблоку утворена одногілковими армоканатами, які:

- в циліндричній частині – обгибають оболонку по гелікоїдальній траєкторії і утворюють два перетинаючих одне одного сімейства армоканатів;
- в купольній частині – утворюють два сімейства приблизно паралельних армоканатов із близькою до ортогональної взаємною орієнтацією АК сімейств.

Відповідно до вихідного проекту до складу СПЗО, зокрема, мають входити:

- в циліндричній частині – 184 одногілкових армоканати, які обгибають циліндричну поверхню під усередненим кутом  $35^{\circ}15'$  до горизонтальної площини;
- в купольній частині – 72 одногілкових армоканати.

Узагальнені схеми розташування армоканатів в циліндрі і куполі захисної оболонки наведені на Рис. 1.1 и Рис. 1.2.

Конструкційні матеріали основних елементів захисної оболонки мають наступні вихідні фізико-механічні характеристики:

- бетон класу В30 по «СНІП 2.03.01-84. Бетонные и железобетонные конструкции» [123]:
  - модуль пружності  $E_b=32500 \text{ МПа (331000 кгс/см}^2)$  (табл. 18 [123]);

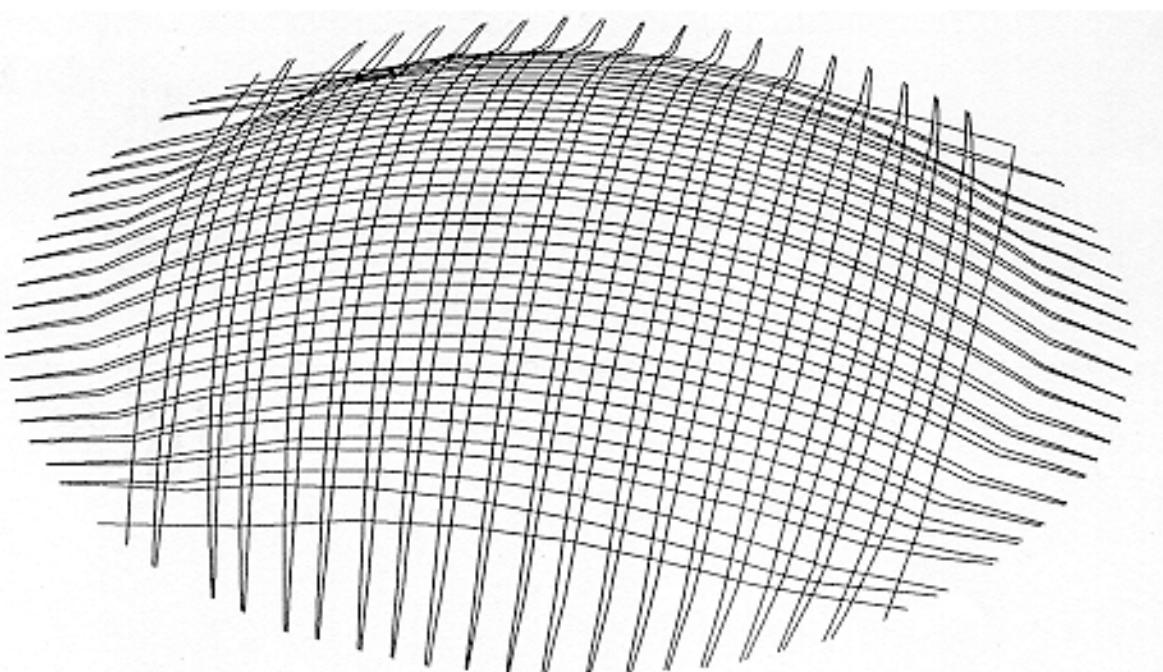


Рис. 1.1 Узагальнена схема розведення армоканатів СПЗО в купольній частині ЗО РВ енергоблоку АЕС

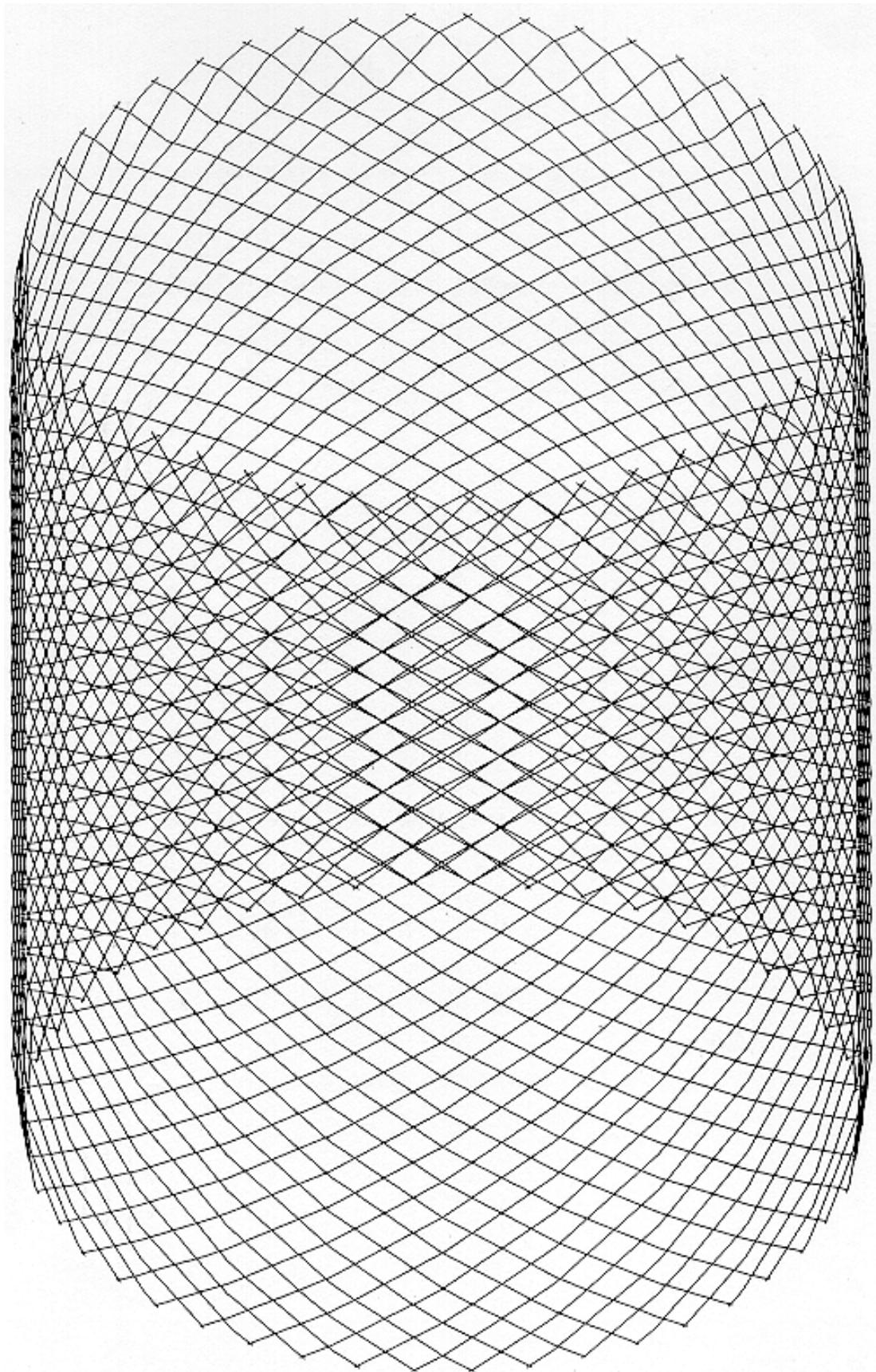


Рис. 1.2 Узагальнена схема розведення армоканатів СПЗО в циліндричній частині ЗО РВ енергоблоку АЕС

- розрахункові опори по граничних станах II групи (по деформівності):
  - стиску  $R_{b,ser}=22.0 \text{ МПа} (224.0 \text{ кгс/см}^2)$  (табл. 12 [123]);
  - розтяганню  $R_{bt,ser}=1.8 \text{ МПа} (18.4 \text{ кгс/см}^2)$  (табл. 12 [123]);
- ненапружена стрижнева арматура  $\varnothing 20 \text{ мм}$  класу А-ІІІ по [123]:
  - модуль пружності  $E_s=200000 \text{ МПа} (2000000 \text{ кгс/см}^2)$  (табл. 29 [123]);
  - коефіцієнт Пуассона  $\nu_s=0.30$ ;
  - усереднена щільність  $\gamma_s=7850 \text{ кг/м}^3$ ;
  - розрахункові опори по граничних станах I групи (по міцності):
    - стиску і розтяганню  $R_s=R_{sc}=365 \text{ МПа} (3750 \text{ кгс/см}^2)$  (табл. 22 [123]);
  - розрахункові опори по граничних станах II групи (по деформівності):
    - стиску – в розрахунках не враховується;
    - розтяганню  $R_{s,ser}=390 \text{ МПа} (4000 \text{ кгс/см}^2)$  (табл. 19 [123]);
- армоканати СПЗО із дротової арматури  $\varnothing 5 \text{ мм}$  класу В-ІІ по [123]:
  - модуль пружності  $E_s=200000 \text{ МПа} (2000000 \text{ кгс/см}^2)$  (табл. 29 [123]);
  - коефіцієнт Пуассона  $\nu_s=0.30$ ;
  - усереднена щільність  $\gamma_s=7850 \text{ кг/м}^3$ ;
  - розрахункові опори по граничних станах I групи (по міцності):
    - стиску  $R_s=400 \text{ МПа} (4000 \text{ кгс/см}^2)$  (табл. 23 [123]);
    - розтяганню  $R_{sc}=1110 \text{ МПа} (11300 \text{ кгс/см}^2)$  (табл. 23 [123]);
  - розрахункові опори по граничних станах II групи (по деформівності):
    - стиску – в розрахунках не враховується;
    - розтяганню  $R_{s,ser}=1335 \text{ МПа} (13600 \text{ кгс/см}^2)$  (табл. 20 [123]);
- гермооблицювання товщиною 8 мм зі сталі класу ВСт3сп5 ГОСТ 380-71\* по «СНІП II-23-81\*. Стальные конструкции» [126]
  - модуль пружності  $E_h=206000 \text{ МПа} (2100000 \text{ кгс/см}^2)$  (табл. 63 [126]);
  - коефіцієнт Пуассона  $\nu_h=0.30$  (табл. 63 [126]);
  - усереднена щільність  $\gamma_h=7850 \text{ кг/м}^3$  (табл. 63 [126]);
  - коефіцієнт лінійного розширення  $\alpha=0.000012 \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$  (табл. 63 [126]);
  - розрахункові опори по граничних станах I групи (по міцності):
    - по межі плинності  $R_y=225 \text{ МПа} (2300 \text{ кгс/см}^2)$  (табл. 51\* [126]);
    - по тимчасовому опору  $R_u=350 \text{ МПа} (3550 \text{ кгс/см}^2)$  (табл. 51\* [126]);

- розрахункові опори по граничних станах II групи (по деформівності):
  - по межі плинності  $R_{un}=235$  МПа ( $2400$  кгс/ $\text{см}^2$ ) (табл. 51\* [126]);
  - по тимчасовому опору  $R_{un}=375$  МПа ( $3800$  кгс/ $\text{см}^2$ ) (табл. 51\* [126]).

Розроблення вихідних проектів захисних оболонок і СПЗО здійснювалось в 1970-1981 pp., інститутами «Атоменергопроект» і «Оргенергострой» (м. Москва, Росія), відповідно до вимог загальнобудівельних НД (див. Рис. 1.3, [128]).

## **1.2 Основні вимоги до функціонування ЗО енергоблоку АЕС**

Конструктивні елементи ЗО, зокрема, всі елементи СПЗО віднесені до 2-го класу безпеки згідно НП 306.2.141-2008 [122], до I-ої категорії відповідальності за ЯРБ згідно ПиН АЭ-5.6 [129], до I-ої категорії сейсмостійкості згідно ПНАЭ Г-5-006-87 [130]. В процесі проектування захисної оболонки, а також розробки обґрунтувань безпеки і працездатності ЗО мають бути враховані і дотримані визначення, вимоги і положення зазначених та інших НД, зокрема, наступні:

- **положення «НП 306.2.141-2008 Загальні положення забезпечення безпеки атомних станцій»** [122]:
  - «2.2. **Аварія** – порушення експлуатації АС, за якого стався вихід радіоактивних речовин і/або іонізуючих випромінювань у кількості, що перевищує визначені проектом межі безпечної експлуатації. Аварія характеризується початковою подією, шляхами протікання і наслідками. ...

**2.7. Безпека АС** – властивість не перевищувати встановлені межі радіаційного впливу на персонал, населення і навколошне природне середовище при нормальній експлуатації АС, порушеннях нормальної експлуатації і проектних аваріях, а також обмежувати радіаційний вплив при запроектних аваріях. ...

**2.21. Герметичне огороження реакторної установки** – сукупність елементів будівельних та інших конструкцій, які захищають простір навколо реакторної установки і систем, що працюють під тиском першого контуру і перешкоджають поширенню радіоактивних речовин у навколошне природне середовище в кількості, що перевищує встановлені межі. ...»

Министерство атомной энергетики  
 и промышленности СССР  
**Всесоюзный государственный  
 научно-исследовательский,  
 проектиро-конструкторский  
 и изыскательский институт**  
**АТОМЭНЕРГОПРОЕКТ**  
 107118 ГСП-16, Москва 5-й Красногорский ул., д. 10, к. 1  
 Телефон: Москва 6 АЗП 47 112796  
 Телеграф: 353-43-47  
 Москва 222301 в г. Москве филиале  
 МИБ г. Москва

23.05.95 21043/19-34  
 На № \_\_\_\_\_

Директору  
 научно-технического центра  
 по ядерной и радиационной  
 безопасности

В.Н.Глыгало

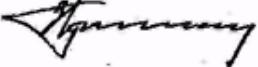
*Кричаний И.Б.*  
 1. Имеются ли упом.  
 ПНАЭ в архиве НТЦ,  
 какую-то у нас?  
 2. Предложите ис.  
 пользование 1. Москву  
*Л. Башинич*  
 5.06.95

На Ваш № 198 от 05.05.95г. сообщаем, что расчеты защитной оболочки энергоблоков ВВЭР-1000 выполнялись в институте Атомэнергопроект в 1980-1981г.г. Эти расчеты в настоящее время хранятся в архиве института. Выполнить с них копии не представляется возможным. Однако мы представим возможность Вашим специалистам ознакомиться с интересующими расчетами в архиве института.

Относительно перечня нормативных документов, в соответствии с которым было выполнено расчетное обоснование защитных оболочек, сообщаем, что в момент проведения расчетов отсутствовали специальные корры и проектирование выполнялось по общестроительным нормам (СНиП). В настоящее время действуют следующие специальные нормативные документы:

ПНАЭ Г-10-007-89	Нормы проектирования железобетонных сооружений локализующих систем безопасности атомных станций.
ПНАЭ Г-10-021-90	Правила устройства и эксплуатации локализующих систем безопасности атомных станций

Директор института



В.И.Курочкин

Иванов 4-16

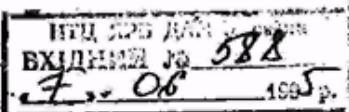


Рис. 1.3 Лист інституту «Атоменергопроект» (м. Москва, Росія) щодо проектування ЗО енергоблоків АЕС України відповідно до вимог загальнобудівельних НД

**«2.35. Зaproектна аварія – аварія, викликана початковими подіями, що не враховуються для проектних аварій, або така, що супроводжується додатковими в порівнянні з проектними аваріями відмовами систем безпеки або помилками персоналу. ...»**

**2.69. Проектна аварія – аварія, для якої проектом визначені вихідні події і кінцеві стани та передбачені системи безпеки, що забезпечують з урахуванням принципу одиничного відмовлення системи (каналу системи) безпеки або однієї додаткової помилки персоналу, обмеження її наслідків установленими межами».**

– **вимоги і положення «ПиН АЭ-5.6. Нормы строительного проектирования АС с реакторами различного типа» [129]:**

«Основные определения ...»

- 15. Максимальная проектная авария (МПА) – проектная авария с наиболее тяжелым исходным событием, устанавливаемым для каждого типа реакторов.
- 16. Контур герметизации – непрерывная конструкция ограничивающая герметичный объем и обеспечивающая его плотность в пределах заданных параметров.
- 17. Силовые воздействия – воздействия как непосредственно от нагрузок, так и воздействия от смещения опор, изменения температуры, усадки и других подобных явлений, вызывающих реактивные силы».

– **вимоги і положення «ПНАЭ Г-5-006-87 Нормы проектирования сейсмостойких атомных станций» [130]:**

- «1.6. К I категории сейсмостойкости относятся:
  - системы нормальной эксплуатации и их элементы, выход из строя которых при сейсмических воздействиях до МРЗ включительно может привести к выходу радиоактивных продуктов в количествах, приводящих к дозовым нагрузкам на население сверх установленных значений для максимальной проектной аварии ...»

1.12. Здания, сооружения, конструкции, оборудование и их элементы I категории сейсмостойкости должны выполнять свои функции по обеспечению безопасности АС во время и после прохождения землетрясения интенсивностью до МРЗ включительно. ...

1.15. Расчеты на сейсмические воздействия зданий, сооружений и оборудования I категории сейсмостойкости следует выполнять при одновременном учете сейсмического воздействия по трем компонентам ...

2.1. Сейсмичность района устанавливается в соответствии со СНиП II-7-81 по карте сейсмического районирования территории ... с последующим уточнением на основе сейсмологических исследований для АС ...

2.3. Сейсмичность площадки для конкретных зданий и сооружений определяется по данным сейсмического микрорайонирования.

Примечание: В пределах площадки в зависимости от инженерно-геологических и гидрогеологических условий расчетная сейсмичность зданий и сооружений одной категории сейсмостойкости может быть различной. ...

2.6. Уточнение сейсмичности площадки с учетом дополнительных проектных проработок в части изменения естественных условий выполняется на стадии инженерных изысканий к проекту по результатам дополнительных сейсмологических исследований. ...

### 3. Расчет строительных конструкций.

3.1. Строительные конструкции I и II категории сейсмостойкости следует проектировать в соответствии со СНиП II-7-81, с учетом требований и уточнений настоящих Норм. ...

3.2. Расчетное значение сейсмической нагрузки при проектировании строительных конструкций I и II категории сейсмостойкости следует определять по формуле:

$$S_{ik} = K_{\varTheta} K_2 K_{\psi} Q_k A \beta_i \eta_{ik},$$

где  $K_{\varTheta}$  – коэффициент, учитывающий особые условия эксплуатации

AC, принимается по п. 3.3;

$A$  – коэффициент, значение которого следует принимать в соответствии с п. 3.4;

$K_2$  – коэффициент, учитывающий конструктивные решения зданий и сооружений, принимается в соответствии со СНиП II-7-81.

Для зданий с перекрестными стенами из монолитного и/или сборно-монолитного железобетона значение коэффициента  $K_2$  следует принимать равным единице.

$K_\psi, Q_k, \beta_i, \eta_{ik}$  – определяют в соответствии со СНиП II-7-81.

3.3. Коэффициент  $K_3$  следует принимать:

3.3.1. При определении сейсмических нагрузок на строительные конструкции I категории сейсмостойкости  $K_3=0,625$ . ...

3.4. Значение коэффициента  $A$  следует принимать по табл. 1 в зависимости от сейсмичности площадки строительства в баллах, соответствующей учитываемому уровню воздействия (МРЗ или ПЗт) на строительные конструкции.

Таблица 1

#### Значения коэффициента $A$

Сейсмичность площадки ... , баллы	5	6	7	8
$A$	0.025	0.05	0.10	0.20

3.5. При расчете строительных конструкций с учетом сейсмического воздействия одновременно по трем компонентам величины горизонтальных усилий определяются в соответствии с п. 3.2, вертикальное усилие определяется по п. 3.2 с коэффициентом 0.5. Следует учитывать наиболее неблагоприятное направление вектора сейсмического воздействия.

3.6. Рекомендуется для зданий и сооружений I категории сейсмостойкости учитывать пространственный характер работы

конструкций. ...

3.11. При расчете сооружений, систем, элементов величины логарифмических декрементов колебаний при отсутствии дополнительных данных следует принимать: для железобетонных конструкций 0,25, для металлических конструкций – 0,12. ...

### Приложение 3 (справочное)

#### Основные понятия, определения

**3. Проектное землетрясение (ПЗ)** – землетрясение, вызывающее на площадке ... сотрясение максимальной интенсивности за период 100 лет.

**4. Максимальное расчетное землетрясение (МРЗ)** – землетрясение, вызывающее на площадке ... сотрясение максимальной интенсивности за период 10 000 лет.

**20. Статический метод расчета на сейсмостойкость** – упрощенный метод, согласно которому распределение сейсмических нагрузок, действующих на конструкцию, принимается подобным распределению массы, а величины этих нагрузок определяются при помощи набора коэффициентов.

**21. Линейно-спектральный метод расчета на сейсмостойкость** – метод, в котором величины сейсмических нагрузок определяются по спектрам ответа в зависимости от частот и форм собственных колебаний конструкции.

**22. Метод динамического анализа сейсмостойкости** – метод численного интегрирования уравнений движения, применяемый для анализа вынужденных колебаний конструкции при сейсмическом воздействии, заданном акселерограммами землетрясений».

– вимоги «ПНАЭ Г-10-007-89. Нормы проектирования железобетонных сооружений локализующих систем безопасности атомных станций» [131]:

- «4.1.5. ... Под непродолжительным раскрытием трещин понимается

их раскрытие при действии нагрузок, входящих в состав предпусковых или кратковременных эксплуатационных режимов, а под продолжительным – раскрытие трещин при действии нагрузок, входящих в состав длительных эксплуатационных режимов.

4.1.6. В особых режимах ширина раскрытия трещин не ограничивается.

**П р и м е ч а н и е .** Ограничение проницаемости конструкций должно обеспечиваться герметизирующей стальной облицовкой.

4.1.7. В особых режимах допускается образование и непродолжительное раскрытие сквозных трещин в бетоне при условии обеспечения их последующего – после снятия особых нагрузок – закрытия до значений, не превышающих предельные, установленные для продолжительного раскрытия, трещин (см. п. 4.1.5).

– **вимоги «ДБН В.1.1-12:2014 Будівництво в сейсмічних районах України» [132]:**

- «6.2.1 Розрахунки споруд на аварійне сполучення навантажень з урахуванням сейсмічного впливу слід виконувати із використанням:
  - спектрального методу ...;
  - прямого динамічного методу із застосуванням інструментальних записів прискорень ґрунту при землетрусах або набору синтезованих акселерограм ...»

Щодо кількості форм власних коливань будівель (споруд), які мають бути враховані при визначенні сейсмічних навантажень наведена наступна вимога.

– «6.3.10 ...Число форм власних коливань будівлі (споруди), які враховуються при визначенні сейсмічних навантажень, необхідно приймати за умови, що сума модальних мас складає не менше 85 % повної суми модальних мас при коливаннях будівлі (споруди) в горизонтальному напрямку і не менше 75 % цієї суми при коливаннях у вертикальному напрямку».

Також, аналогічно до п. 3.11 ПНАЭ Г-5-006-87 [130] (див. вище) в ДБН В.1.1-12:2014 [132] вказано, що:

«9.4.6 Виконуючи динамічний аналіз сейсмостійкості слід використовувати значення параметрів загасання  $\zeta$ , встановлені на основі динамічних досліджень поведінки споруд за сейсмічних впливів.

За відсутності експериментальних даних про реальні величини параметрів загасання в розрахунках сейсмостійкості допускається застосовувати наступні значення логарифмічних декрементів коливань:

- залізобетонні і кам'яні конструкції:  $\delta = 0,3$  ;
- сталеві конструкції:  $\delta = 0,15$  .

Виходячи з вищевикладених вимог НД, є підстави стверджувати, що в поточний час в Україні задача реалістичної оцінки сейсмостійкості техногенно небезпечних споруд, конструкцій і виробництв є як конче актуальною, так і достатньо складною для вирішення, зважаючи на потребу врахування наступної сукупності факторів:

- 1) необхідність використання актуалізованих даних про сейсмічну небезпеку території розташування майданчику об'єкту, що розглядається – трикомпонентних акселерограм та/або спектрів відповіді – отриманих за результатами відповідних інженерних довишукувань;
- 2) необхідність застосування для досліджуваного об'єкта (з метою отримання достовірних значень параметрів НДС) розрахункової моделі, яка містить десятки і сотні тисяч невідомих метода скінчених елементів (МСЕ) або іншого чисельного метода;
- 3) необхідність застосування для обґрунтування сейсмостійкості споруд АЕС (згідно п. 6.2.2 «ДБН В.1.1-12:2014 Будівництво у сейсмічних районах України» [132]) прямого динамічного метода (в термінології «ПНАЭ Г-5-006-87. Нормы проектирования сейсмостойких атомных станций» – метода динамического анализа сейсмостойкости) – який є більш реалістичним, ніж традиційні надлишково консервативний лінійно-спектральний метод або статичний метод розрахунку на сейсмостійкість, якому притаманна низька достовірність;
- 4) велика тривалість (порядку десятків годин) виконання розрахункового моделювання динамічної поведінки складних об'єктів прямим динамічним

методом, який вимагає застосування достатньо малих шагів часу при чисельному інтегруванні рівнянь руху, сформованих з використанням МСЕ.

### **1.3 Огляд досліджень динаміки ЗО АЕС при короткочасних навантаженнях**

Викладення основних відомих підходів до виконання аналізу НДС і динамічної поведінки споруд АЕС, зокрема ЗО, при короткочасних динамічних навантаженнях, а також результатів відповідних досліджень викладено в узагальнюючих публікаціях [129, 133, 134]. При цьому, слід зауважити, що в згаданих публікаціях:

- задекларована наступна достатньо повна номенклатура потенційно можливих чинників короткочасних динамічних навантажень – ураган, смерч (торнадо), хвилі цунамі, землетрус, промислові детонаційний та дефлаграційний вибухи, струмені теплоносія, биття трубопроводів, удари предметів, що летять, максимальна проектна аварія, падіння літака;
- здебільшого наводяться емпіричні формули для визначення інтенсивності динамічного впливу зазначених чинників, її зміни в часі, площі і глибини пошкодження конструкції внаслідок реалізації впливу відповідних динамічних навантажень;
- в якості основних методів розрахунку НДС і динамічної поведінки конструкцій і споруд АЕС пропонується:
  - квазістатичний метод розрахунку, якому притаманна низька достовірність, та
  - надмірно консервативний лінійно-спектральний метод.
- не наведена інформація (описи досліджень, результати обчислень) щодо:
  - використання в розрахунках НДС і динамічної поведінки конструкцій і споруд АЕС найбільш реалістичного прямого динамічного методу;
  - розрахунків НДС і динамічної поведінки ЗО в умовах максимальної проектної аварії (в сукупності з впливом проектного землетрусу), а також в умовах запроектної аварії (в сукупності з впливом від дефлаграційного вибуху повітряно-водневої суміші в РВ);

- дотримання цілісності герметизуючого сталевого облицювання (збереження локалізуючої функції) ЗО в вищезазначених або інших подібних аварійних умовах.

В якості ілюстрації вищевикладених положень можна навести роботу [11], в якій, зокрема, вказано наступне «... была решена задача об исследованию НДС ЗО реакторного отделения АЭС при падении на нее самолета под углом 45°. Выполнение расчета оболочки в случае воздействия на нее только ударной нагрузки (за исключением собственного веса и предварительного напряжения) в известной степени противоречит физически возможной картине состояния ЗО. Однако в целях возможности более детального анализа влияния отдельных факторов на общее напряженное состояние конструкции приведены эти промежуточные расчеты».

#### **1.4 Висновки по розділу «Вступ» і розділу 1**

1 ЗО являє собою комбіновану тонкостінну конструкцію, утворену циліндричною і сферичною оболонками, які мають узагальнено двухшарову структуру – зовнішній шар попередньо напряженого залізобетону і внутрішній шар металу – герметизуюче сталеве облицювання. ЗО РВ енергоблоків АЕС є компонентами системи глибокоешелонированного захисту реакторної установки, ізоляють РУ від зовнішніх природних і техногенних впливів, а також забезпечують локалізацію радіоактивних речовин в підоболонковому просторі при потенційно можливих аваріях в РВ.

2 Проектування ЗО РВ енергоблоків АЕС відбувалось в період 1970-1980 рр. з використанням спрощених інженерних методик з обмеженими можливостями – застосовних виключно для оболонок ідеальної геометричної форми (конус, циліндр, сфера тощо) і найпростіших типів навантажень (власна вага, нормальній тиск) – на підставі вимог загальнопромислових нормативних документів будівельного і технологічного профілю. Відповідно, виникла потреба підтвердження:

- відповідності конструкції ЗО (в частині її працездатності – міцності, щільності (суцільності)) вимогам з безпеки, наведеним в НД з ЯРБ України і

керівництвах з безпеки МАГАТЕ, які набули чинності після 1986 р., а також

- стійкості конструкції ЗО до зовнішніх природних і внутрішніх технологічних екстремальних (зокрема, аварійних) впливів з уточненими параметрами – більш жорсткими, ніж параметри, враховані в процесі проектування.

3 Наявний досвід інструментального і розрахункового аналізу поточного таєхнічного стану конструкції ЗО засвідчив недостатню ефективність та/або коректність реалізації застосованих підходів, а саме:

- застосовані спрощені розрахункові інженерні методики принципово не дають змоги коректно змоделювати термомеханічну та/або динамічну поведінку конструкцій систем і елементів енергоблоку АЕС в складних умовах потенційно можливих проектних і запроектних аварій, а також при дії зовнішніх екстремальних впливів;
- застосування методів візуального і інструментального (неруйнівного) контролю конструкцій можливо виключно в період планово-попереджуvalьних ремонтів (в режимі реакторної установки «холодний останов») і є неможливим навіть при нормальній експлуатації РУ (в режимі «робота реактора на потужності»), не говорячи про фіксацію наслідків динамічних навантажень на ЗО в аварійних умовах або в умовах прояву екстремальних зовнішніх впливів;
- аналіз змісту низки розрахункових (виконаних з використанням методу скінчених елементів) досліджень НДС і працездатності ЗО, а саме – застосованих розрахункових МСЕ-моделей ЗО (див. розділ «Вступ») – свідчить про притаманні цим моделям суттєві некоректності, які однозначно мали призвести до отримання нереалістичних (недостовірних) значень параметрів НДС та до необґрутованих висновків щодо працездатності ЗО.

4 Як наслідок, залишається актуальним питання вирішення шляхом коректних розрахунків НДС проблеми підтвердження безпеки енергоблоків АЕС в частині збереження працездатності ЗО в умовах динамічних впливів при МПА і ЗПА.

**РОЗДІЛ 2 ОСНОВНІ ПОЛОЖЕННЯ МЕХАНІКИ ТВЕРДОГО  
ДЕФОРМІВНОГО ТІЛА І МЕТОДУ СКІНЧЕНИХ  
ЕЛЕМЕНТІВ, ЗАСТОСОВАНІ ПРИ  
МАТЕМАТИЧНОМУ МОДЕЛЮВАННІ НДС І  
ДИНАМІЧНОЇ ПОВЕДІНКИ ЗО. ОБЧИСЛЮВАЛЬНІ  
АЛГОРИТМИ РОЗВ'ЯЗАННЯ РІВНЯНЬ ДИНАМІКИ  
ОБОЛОНКОВИХ КОНСТРУКЦІЙ**

**2.1 Вихідні передумови, гіпотези і співвідношення**

Як зазначено вище в розділі «Вступ», враховуючи особливості конструкції ЗО і характеристики проектних впливів на споруду для аналізу НДС і динамічної поведінки будівлі в аварійних умовах був обраний метод скінчених елементів, якому притаманні інженерна наочність, можливість необхідного ступеню деталізації розрахункових моделей, алгоритмічність тощо.

В цій роботі тонкостінна оболонкова конструкція розглядається як тривимірне тіло, яке знаходиться під впливом об'ємних і поверхневих навантажень і підпадає під визначення, наведене в [135], а саме – «Оболочкою называется твердое тело, ограниченное двумя граничными поверхностями и контурной поверхностью, пересекающей граничные поверхности вдоль контурных кривых. Между граничными поверхностями располагается основная (или координатная) поверхность оболочки. Выбор основной поверхности произведен и производится на основании условий конкретной задачи. Цель выбора – упрощение системы» ... «разрешающих уравнений ... Толщиной оболочки называется длина отрезка нормали к основной поверхности, заключенной между граничными поверхностями оболочки. ... Толщина оболочки может быть постоянной и переменной. Геометрическое место средин отрезков нормалей, определяющих толщину оболочки, будет условно называться срединной поверхностью оболочки».

Отримання розв'язуючих рівнянь для оболонкової конструкції в цій роботі здійснюється в тензорній формі на основі співвідношень теорії пружності. Залучення тензорного апарату дає змогу при розробці методики розрахунку в компактній і загальній аналітичній формі викласти основні її співвідношення, а при

чисельній реалізації методики – створити ефективні обчислювальні алгоритми.

Дотримуючись загальних правил тензорного обчислення [136, 135], введемо наступні додаткові обумовленості:

- 1) індекси латинської абетки приймають значення 1, 2, 3, а індекси грецької – 2, 3;
- 2) індекси компонент векторів и тензорів, представлених в декартовій системі координат, супроводжуються штрихом;
- 3) по індексам, взятым в дужки, підсумовування не виконується.

Будемо користуватись двома системами координат (Рис. 2.1): базовою («глобальною») декартовою з осями  $(Z^1, Z^2, Z^3)$  і координатами  $(z^1, z^2, z^3)$ , а також місцевою (локальною, пов'язаною з конкретним скінченим елементом) косокутною з осями  $(X^1, X^2, X^3)$  і координатами  $(x^1, x^2, x^3)$ . При цьому, одразу зазначимо, що координатна вісь  $X^1$  спрямована по товщині оболонки (Рис. 2.2).

Вибір декартової системи координат в якості базової (тобто системи координат, в якій визначатимуться невідомі величини) має низку переваг, порівняно з іншими підходами (системами координат), оскільки в зазначеному випадку спрошується отримання рівнянь рівноваги МСЕ-моделі конструкції, полегшується завдання геометрії об'єкта, функцій розподілу навантажень для оболонкових конструкцій довільного обрису тощо.

В косокутних координатах:

- найбільш природно і стисло описуються геометричні характеристики скінчених елементів, зокрема, поверхні окремих СЕ, які сукупно утворюють обмежуючі поверхні тіл складної форми, а також
- компактно записуються співвідношення теорії пружності.

Вибір місцевої системи координат здійснюється окремо для кожного СЕ конструкції, обраної для розрахунку, і безпосередньо пов'язаний із схемою розбиття конструкції на скінчені елементи.

Розглянемо довільну точку  $M$  оболонки, положення якої в просторі задане радіусом-вектором  $\vec{r}$  (Рис. 2.1). Тоді для декартової і місцевої систем координат можуть бути визначені дві сукупності базисних векторів:

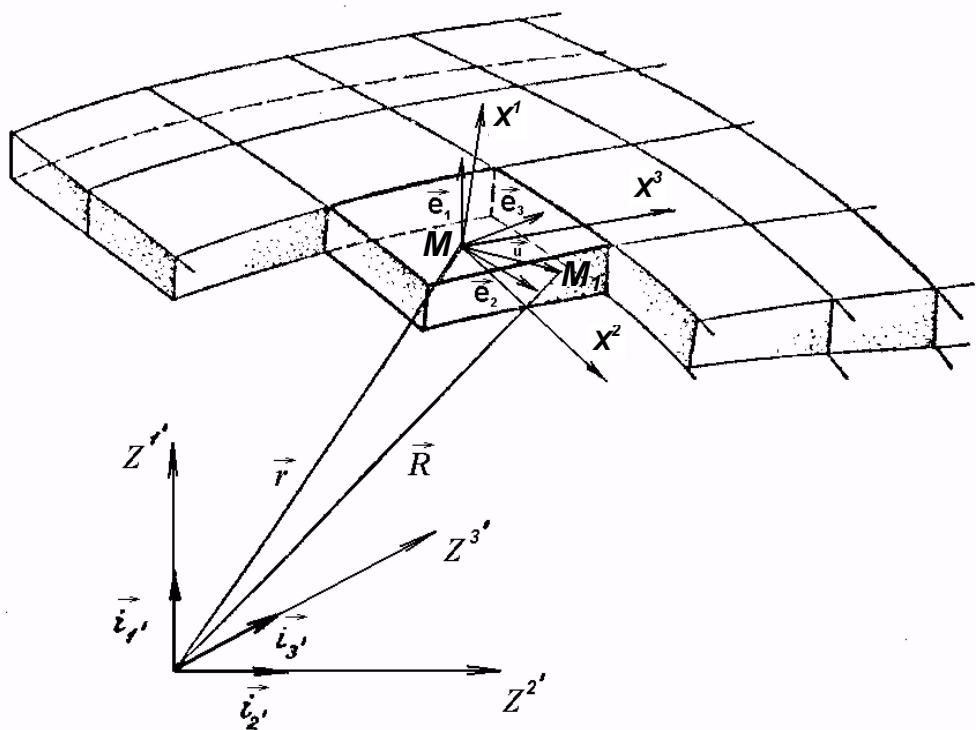


Рис. 2.1 Базова («глобальна») декартова ( $Z^1$ ,  $Z^2$ ,  $Z^3$ ) и місцева (локальна, пов'язаною з конкретним скінченим елементом) косокутна ( $X^1$ ,  $X^2$ ,  $X^3$ ) системи координат.

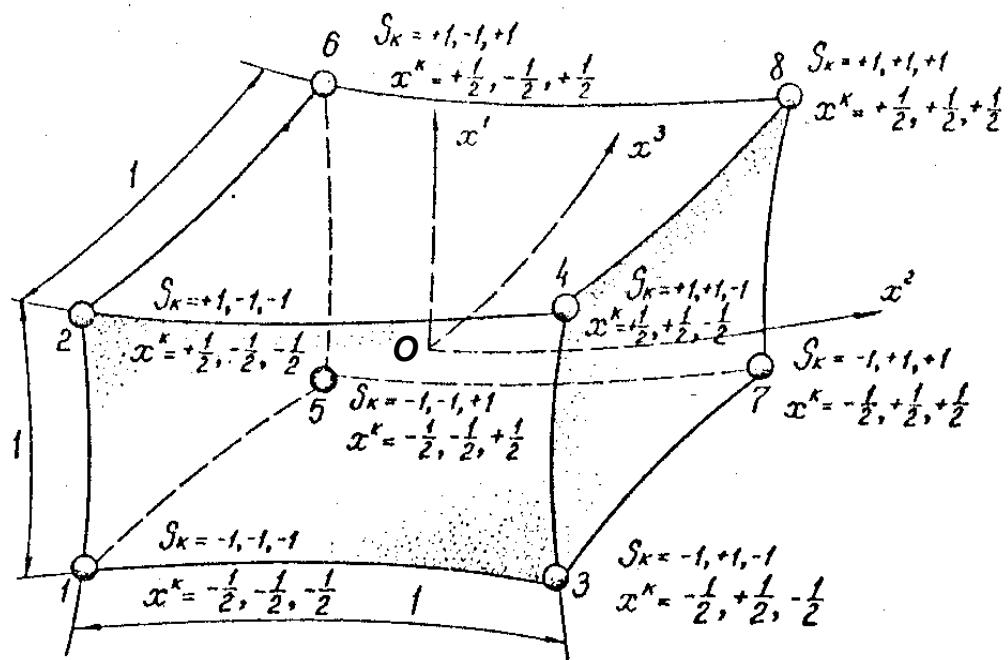


Рис. 2.2 Місцеві координати вузлів скінченого елемента.

– основні:

$$\vec{e}_{i'} = \frac{\partial \vec{r}}{\partial z^{i'}} , \quad \vec{e}_i = \frac{\partial \vec{r}}{\partial x^i} , \quad i \quad (2.1)$$

– взаємні  $\vec{e}^{i'}, \vec{e}^i$ , пов'язані з основними наступними співвідношеннями:

$$\vec{e}_{j'} \cdot \vec{e}^{i'} = \delta_{j'}^{i'} , \quad \vec{e}_j \cdot \vec{e}^i = \delta_j^i , \quad (2.2)$$

де  $\delta_j^i$  – символ Кронекера.

Кожній системі координат притаманний метричний тензор, коваріантні і контраваріантні компоненти якого визначаються наступним чином:

$$g_{i'j'} = \vec{e}_{i'} \cdot \vec{e}_{j'} = \delta_{j'}^{i'} , \quad g_{ij} = \vec{e}_i \cdot \vec{e}_j , \quad g^{i'j'} = \vec{e}^{i'} \cdot \vec{e}^{j'} = \delta^{i'}_{j'} , \quad g^{ij} = \vec{e}^i \cdot \vec{e}^j . \quad (2.3)$$

Елементарний об'єм тіла в місцевій системі координат визначаються співвідношенням:

$$dV = \sqrt{g} \cdot dx^1 dx^2 dx^3 , \quad (2.4)$$

де  $\sqrt{g}$  – визначник метричного тензора.

Зв'язок між базовою і місцевою системами координат буде заданий, якщо відомі компоненти тензорів перетворення однієї системи координат в іншу, а саме – тензори прямого перетворення координат

$$C_j^{i'} = \frac{\partial z^{i'}}{\partial x^j} , \quad (2.5)$$

і тензори зворотного перетворення координат

$$C_{j'}^i = \frac{\partial x^i}{\partial z^{j'}} , \quad (2.6)$$

компоненти, яких задовольняють наступним умовам (співвідношенням)

$$\vec{e}_i = C_j^{i'} \cdot \vec{e}_{i'} , \quad \vec{e}_{j'} = C_{j'}^i \cdot \vec{e}_i , \quad (2.7)$$

$$g_{ij} = C_i^{k'} \cdot C_j^{n'} \cdot g_{k'n'} = C_i^{k'} \cdot C_j^{n'} . \quad (2.8)$$

При деформуванні оболонки радіус-вектор точки  $M$  оболонки зміниться

$$\vec{R} = \vec{r} + \vec{u} , \quad (2.9)$$

де  $\vec{u}$  – вектор зміщення точки  $M$  в просторі.

Метричні характеристики деформованої місцевої системи координат  $G_{ij}$

визначаються за співвідношеннями аналогічними (2.1, 2.3), але з урахуванням (2.9)

$$G_{ij} = \left( \vec{e}_i + \frac{\partial \vec{u}}{\partial x^i} \right) \cdot \left( \vec{e}_j + \frac{\partial \vec{u}}{\partial x^j} \right) = g_{ij} + \vec{e}_i \cdot \frac{\partial \vec{u}}{\partial x^j} + \vec{e}_j \cdot \frac{\partial \vec{u}}{\partial x^i} + \frac{\partial \vec{u}}{\partial x^i} \cdot \frac{\partial \vec{u}}{\partial x^j} \quad (2.10)$$

Різниця значень компонент метричних тензорів до і після деформації оболонки визначає тензор скінчених деформацій Коши-Гріна

$$\varepsilon_{ij} = \frac{1}{2} (G_{ij} - g_{ij}) \quad (2.11)$$

Визначимо тензор скінчених деформацій як суму лінійної  $\bar{\varepsilon}_{ij}$  (тензор нескінченно малих деформацій) і нелінійної  $\tilde{\varepsilon}_{ij}$  частин

$$\varepsilon_{ij} = \bar{\varepsilon}_{ij} + \tilde{\varepsilon}_{ij}, \quad (2.12)$$

$$\bar{\varepsilon}_{ij} = \frac{1}{2} (\nabla_i u_j + \nabla_j u_i), \quad (2.13)$$

$$\tilde{\varepsilon}_{ij} = \frac{1}{2} \nabla_i u_l \nabla_j u_l g^{il}, \quad (2.14)$$

$$\nabla_i u_l = \frac{\partial u_j}{\partial x^i} - u_l \Gamma_{ij}^l, \quad (2.15)$$

де  $\Gamma_{ij}^l$  – символи Кристофеля другого роду, значення яких для притаманної СЕ місцевої системи координат (прямолінійна косокутна незмінна в межах об’єму СЕ) тотожно дорівнюють нулю. Відповідно, з співвідношення (2.15) отримаємо

$$\nabla_i u_l = \frac{\partial u_j}{\partial x^i}. \quad (2.16)$$

При завданні вектора переміщень в декартовій системі координат компоненти градієнта вектора переміщень  $\nabla_i u_l$  матимуть наступний вигляд:

$$\nabla_i u_l = C_j^{k'} \frac{\partial u^{k'}}{\partial x^i}. \quad (2.17)$$

Відповідно вирази (2.12)-(2.14) для  $\varepsilon_{ij}$ ,  $\bar{\varepsilon}_{ij}$  і  $\tilde{\varepsilon}_{ij}$  зміняться на наступні

$$\varepsilon_{ij} = \frac{1}{2} \left( C_j^{k'} \frac{\partial u^{k'}}{\partial x^i} + C_i^{k'} \frac{\partial u^{k'}}{\partial x^j} + \frac{\partial u^{k'}}{\partial x^i} \cdot \frac{\partial u^{k'}}{\partial x^j} \right), \quad (2.18)$$

$$\bar{\varepsilon}_{ij} = \frac{1}{2} \left( C_j^{k'} \frac{\partial u^{k'}}{\partial x^i} + C_i^{k'} \frac{\partial u^{k'}}{\partial x^j} \right), \quad (2.19)$$

$$\tilde{\varepsilon}_{ij} = \frac{1}{2} \cdot \frac{\partial u^{k'}}{\partial x^i} \cdot \frac{\partial u^{k'}}{\partial x^j} . \quad (2.20)$$

Як наслідок, тензор скінчених деформацій  $\varepsilon_{ij}$  перетворенням виразу (2.18) може бути наведений у вигляді

$$\varepsilon_{ij} = \frac{1}{2} \left( C_j^{k'} \frac{\partial u^{k'}}{\partial x^i} + C_i^{k'} \frac{\partial u^{k'}}{\partial x^j} \right) . \quad (2.21)$$

де

$$C_i^{k'} = \frac{\partial (z^{k'} + 0.5 \cdot u^{k'})}{\partial x^i} . \quad (2.22)$$

Тобто, рівняння МСЕ для лінійного (2.19) і нелінійного (2.21) варіантів матимуть аналогічний вигляд, якщо в другому випадку буде, зважаючи на деформування тіла, здійснена заміна компонент тензора перетворення координат

$C_j^{i'} = \frac{\partial z^{i'}}{\partial x^j}$  на відкориговані компоненти, визначені згідно співвідношенню (2.22).

В цій роботі досліджуються малі деформації пружних тіл, які прийнятно, а саме – з високим ступенем достовірності – задовольняють моделі нескінченно малих деформацій (див. формули (2.13), (2.19)) і для яких співвідношення між компонентами тензорів напружень і деформацій визначається узагальненим законом Гука [137]:

$$\sigma^{ij} = C^{ijkl} \varepsilon_{kl} . \quad (2.23)$$

де  $C^{ijkl}$  – компоненти тензора пружних сталих, яким притаманна симетрія

$$C^{ijkl} = C^{ilij} = C^{jikl} = C^{klji} = C^{ijlk} = C^{lkij} = C^{jilk} = C^{lkji} = C^{klji} . \quad (2.24)$$

При цьому в загальному випадку залишається лише 21 незалежна компонента.

Для ізотропного матеріалу, який розглядається в цій роботі, компоненти тензора пружних сталих в місцевій (косокутній) системі координат можна виразити через коефіцієнти Ляме  $\lambda$  и  $\mu$  [137]

$$C^{ijkl} = \lambda g^{ij} g^{kl} + \mu (g^{ik} g^{jl} + g^{il} g^{jk}) , \quad (2.25)$$

$$\lambda = \frac{E\nu}{(1-2\nu)(1+\nu)} , \quad \mu = \frac{E}{2(1+\nu)} , \quad (2.26)$$

де  $E$  – модуль пружності,  $\nu$  – коефіцієнт Пуассона.

Фізичні компоненти тензора пружних сталих і градієнта вектора зміщень визначаються формулами

$$\bar{C}^{ijkl} = C^{ijkl} \cdot \sqrt{g_{(ii)} g_{(jj)} g_{(kk)} g_{(ll)}} , \quad (2.27)$$

$$\nabla_i \bar{u}_j = \frac{\nabla_i u_j}{\sqrt{g_{(ii)} g_{(jj)}}} . \quad (2.28)$$

Для скінчених елементів, якими моделюється НДС суттєво оболонкових (тонкостінних) конструкцій – тобто таких, для яких розмір по товщині досліджуваного фрагмента, зокрема СЕ, є суттєво меншим за розміри по іншим місцевим координатним осям – застосовується гіпотеза про сталість напружень обтиснення в напрямку товщини фрагменту (СЕ) у вигляді

$$\frac{\partial \sigma^{II}}{\partial x^I} = 0 , \quad \frac{\partial^2 \sigma^{II}}{\partial x^I \partial x^2} = 0 , \quad \frac{\partial^2 \sigma^{II}}{\partial x^I \partial x^3} = 0 . \quad (2.29)$$

Інші гіпотези щодо напруженено-деформованого стану оболонкових (тонкостінних) конструкцій, порівняно з об'ємним (тривимірним) тілом, не застосовуються.

## 2.2 Моментна схема скінчених елементів в задачах визначення НДС і динамічної поведінки оболонкових конструкцій

Дотримуючись при отриманні співвідношень МСЕ процедури моментної схеми скінчених елементів (МССЕ), відобразимо область  $V$ , яку займає скінчений елемент, на куб з одиничними ребрами, в центрі якого розташуємо початок місцевої (локальної) системи координат  $(X^1, X^2, X^3)$ , зорієнтувавши її осі таким чином, щоб вони були спрямовані вздовж ребер і проходили через геометричні центри граней. При цьому координатна вісь  $X^1$ , як вказано вище в розділі 2.1, має бути орієнтована по товщині оболонки (в напрямку меншого фізичного розміру СЕ) (Рис. 2.2).

Виразимо декартові координати  $Z^{b'}$  довільної точки скінченого елемента за допомогою однорідних поліномів Лагранжа через декартові координати вузлів СЕ

$$Z^{b'} = \sum_{p_1=\pm 1} \sum_{p_2=\pm 1} \sum_{p_3=\pm 1} \prod_{k=1}^3 \left( p_{(k)} x^{(k)} + \frac{1}{2} \right) Z_{p_1 p_2 p_3}^{b'} , \quad (2.30)$$

де  $Z_{p_1 p_2 p_3}^{b'}$  – декартові координати вузлів СЕ,

$-1 < x^k < 1$  – координати точки СЕ в місцевій системі координат (Рис. 2.2),

$$p_k = \begin{cases} +1 & \text{при } x^k > 0 \\ -1 & \text{при } x^k < 0 \end{cases}. \quad (2.31)$$

Такий підхід дозволить, в процесі моделювання динамічної поведінки оболонки на основі метода продовження по параметру, змінювати вихідну геометрію конструкції, тобто для скінченого елемента обумовлюється можливість деформування місцевої системи координат.

В цій роботі розглядаються і застосовуються для розрахунків 3О ізопараметричні СЕ, в яких для апроксимації переміщень застосовуються ті ж самі вузлові точки і ті ж самі функції форми, що і для апроксимації координат. В якості невідомих застосовуються вузлові переміщення СЕ в декартовій системі координат, а в якості функції форми – функції розподілу переміщень в межах об’єму скінченого елемента – полілінійний закон Лагранжа

$$U^{b'} = \sum_{p_1=\pm 1} \sum_{p_2=\pm 1} \sum_{p_3=\pm 1} \prod_{k=1}^3 \left( p_{(k)} x^{(k)} + \frac{1}{2} \right) U_{p_1 p_2 p_3}^{b'}, \quad (2.32)$$

де  $U_{p_1 p_2 p_3}^{b'}$  – вузлові переміщення СЕ,

Для прийнятого закону розподілу переміщень в межах СЕ (2.32) згідно МССЕ функцію деформацій  $\varepsilon_{ij}$  (2.21) представимо у вигляді ряду Маклорена. Наведемо розкладання лише першого доданка (див. 2.33)

$$\tilde{C}_j^{k'} \frac{\partial U^{k'}}{\partial x^i} = \zeta_{ij} + \varphi_{ij}^m x^m \omega_{(ij)}^{(mm)} + \psi_{ij}^{mn} x^m x^n \delta_{(j)}^{(i)} \omega_{(mmn)}^{(nni)} \quad (2.33)$$

,

де значення компонент  $\zeta_{ij}$ ,  $\varphi_{ij}^k$ ,  $\psi_{ij}^{kl}$  визначаються в центрі  $O$  СЕ (див. Рис. 2.2) згідно наступним математичним співвідношенням

$$\begin{aligned} \zeta_{ij} &= (\varepsilon_{ij})_0 = \frac{1}{4} \sum_{p_1=\pm 1} \sum_{p_2=\pm 1} \sum_{p_3=\pm 1} \tilde{C}_{j(0)}^{b'} P_i \cdot U_{p_1 p_2 p_3}^{b'}, \\ \varphi_{ij}^k &= \left( \frac{\partial \varepsilon_{ij}}{\partial x^k} \right)_0 = \frac{1}{2} \sum_{p_1=\pm 1} \sum_{p_2=\pm 1} \sum_{p_3=\pm 1} \tilde{C}_{j p_{(m)}}^{b'} P_i P_m \cdot U_{p_1 p_2 p_3}^{b'}, \end{aligned} \quad (2.34)$$

$$\psi_{ij}^{mn} = \left( \frac{\partial^2 \varepsilon_{ij}}{\partial x^k \partial x^l} \right)_0 = \frac{1}{2} \sum_{p_1=\pm 1} \sum_{p_2=\pm 1} \sum_{p_3=\pm 1} \check{C}_{j p_{(m)} p_{(n)}}^{b'} p_i p_m p_n \cdot U_{p_1 p_2 p_3}^{b'} ,$$

де  $\check{C}_{j(0)}^{b'}$ ,  $\check{C}_{j p_{(m)}}^{b'}$ ,  $\check{C}_{j p_{(m)} p_{(n)}}^{b'}$  – значення компонент тензора перетворень координат (2.5, 2.22) в центрі об’єма  $O$  СЕ, в центрі грані  $p_m$  СЕ і в центрі ребра  $p_m p_n$  СЕ.

Символ Кронекера  $\delta_{(j)}^{(i)}$  и функція  $\omega_{(mmn)}^{(nni)}$  в виразі (2.33) забезпечують врахування (виключення) ефекту «жорстких зміщень» СЕ і визначаються наступним чином

$$\delta_{(j)}^{(i)} = \begin{cases} 1 & \text{при } i = j \\ 0 & \text{при } i \neq j \end{cases}, \quad (2.35)$$

$$\omega_{mmn...}^{nni...} = \omega_m^n \omega_m^i \omega_n^i ... , \quad \omega_m^n = \begin{cases} 1 & \text{при } m \neq n \\ 0 & \text{при } m = n \end{cases} . \quad (2.36)$$

В розгорнутому вигляді вираз (2.33) матиме наступний вигляд

$$\begin{aligned} \varepsilon_{11} &= \zeta_{11} + \varphi_{11}^2 x^2 + \varphi_{11}^3 x^3 + (\psi_{11}^{23} + \psi_{11}^{32}) x^2 x^3 , \\ \varepsilon_{22} &= \zeta_{22} + \varphi_{22}^1 x^1 + \varphi_{22}^3 x^3 + (\psi_{22}^{13} + \psi_{22}^{31}) x^1 x^3 , \\ \varepsilon_{33} &= \zeta_{33} + \varphi_{33}^1 x^1 + \varphi_{33}^2 x^2 + (\psi_{33}^{12} + \psi_{33}^{21}) x^1 x^2 , \\ \varepsilon_{12} &= \zeta_{12} + \varphi_{12}^3 x^3 , \quad \varepsilon_{13} = \zeta_{13} + \varphi_{13}^2 x^2 , \quad \varepsilon_{23} = \zeta_{23} + \varphi_{23}^1 x^1 . \end{aligned} \quad (2.37)$$

Вирази для компонент тензора перетворення  $\check{C}_j^{b'}$  отримаємо, виходячи з співвідношень (2.5, 2.22, 2.30, 2.32)

$$\begin{aligned} \check{C}_1^{b'} &= \sum_{p_1=\pm 1} \sum_{p_2=\pm 1} \sum_{p_3=\pm 1} p_1 \left( p_2 x^2 + \frac{1}{2} \right) \left( p_3 x^3 + \frac{1}{2} \right) \left( Z_{p_1 p_2 p_3}^{b'} + \frac{1}{2} U_{p_1 p_2 p_3}^{b'} \right) , \\ \check{C}_2^{b'} &= \sum_{p_1=\pm 1} \sum_{p_2=\pm 1} \sum_{p_3=\pm 1} p_2 \left( p_3 x^3 + \frac{1}{2} \right) \left( p_1 x^1 + \frac{1}{2} \right) \left( Z_{p_1 p_2 p_3}^{b'} + \frac{1}{2} U_{p_1 p_2 p_3}^{b'} \right) , \\ \check{C}_3^{b'} &= \sum_{p_1=\pm 1} \sum_{p_2=\pm 1} \sum_{p_3=\pm 1} p_3 \left( p_1 x^1 + \frac{1}{2} \right) \left( p_2 x^2 + \frac{1}{2} \right) \left( Z_{p_1 p_2 p_3}^{b'} + \frac{1}{2} U_{p_1 p_2 p_3}^{b'} \right) . \end{aligned} \quad (2.38)$$

Вирази (2.33-2.37) визначають характер зміни деформацій по об’єму скінченого елемента, який розглядається. Означимо, що коефіцієнти  $\zeta_{ij}$ ,  $\varphi_{ij}^k$ ,  $\psi_{ij}^{kl}$  розкладання (2.34) є функціями переміщень  $U_{p_1 p_2 p_3}^{b'}$  вузлів скінченого елемента, при

цьому згідно виразам (2.34-2.38) коефіцієнти ряду (2.33) складаються з лінійної і нелінійної складових (функцій) переміщень вузлів СЕ.

Проаналізувавши (2.34, 2.37), можна впевнитись, що врахування жорстких зміщень здійснений коректно. Наприклад, при пласкопаралельному зміщенні скінченого елемента всі вузлові зміщення є рівними і їх можна винести за знак додавання. При додаванні з'ясовується, що всі компоненти деформацій будуть нульовими.

В рядах (2.33-2.37) утримані лише ті члени, які при обраному законі зміни переміщень по об'єму СЕ можуть бути точно обчислені (тобто, є аналогічними відповідним членам для функцій форми більш високого ступеню апроксимації). Інші варіанти призначення членів ряду, які відповідають іншим схемам МСЕ, погіршують розрахункові властивості скінченого елемента і призводять до появи паразитних явищ таких, як виникнення деформацій при зміщеннях скінченого елемента як жорсткого цілого, і обумовлені цим ефекти «жорсткого зміщення», «ложного (похибкового) зсуву» тощо [138]. Аналіз збігу і стійкості наближених рішень наведений в роботах [139, 140, 141].

Компоненти тензора напружень визначатимемо аналогічно ряду (2.33)

$$\sigma^{ij} = N^{ij} + M_m^{ij} x^m \omega_{(ij)}^{(mm)} + M_{mn}^{ij} x^m x^n \delta_{(j)}^{(i)} \omega_{(mmn)}^{(nn)}, \quad (2.39)$$

де

$$N^{ij} = (\sigma^{ij})_o = C^{ijkl} \zeta_{kl}, \quad (2.40)$$

$$M_m^{ij} = \left( \frac{\partial \sigma^{ij}}{\partial x^m} \right)_o = C^{ijkl} \varphi_{kl}^m \omega_{(mm)}^{(kl)}, \quad (2.41)$$

$$M_{mn}^{ij} = \left( \frac{\partial^2 \sigma^{ij}}{\partial x^m \partial x^n} \right)_o = C^{ijkl} \psi_{kl}^{mn} \delta_{(l)}^{(k)} \omega_{(mmn)}^{(nn)}. \quad (2.42)$$

В наведених співвідношеннях компоненти тензора пружних сталих прийняті постійними в межах об'єму СЕ і дорівнюють їх значенням в центрі скінченого елемента. Введення такого припущення обумовлено тим, що навіть для непологої оболонки ділянка її серединної поверхні, яка припадає на один скінчений елемент, зазвичай є пологою. Обчислювальні експерименти [135, 142, 143] показали, що похибка, що вноситься не перешкоджає розгляду оболонок складної форми і при згущенні сітки швидко спадає.

Розгорнутий математичний вираз компонент тензора напружень має вигляд аналогічний (2.37)

$$\begin{aligned}\sigma^{11} &= N^{11} + M_2^{11}x^2 + M_3^{11}x^3 + \left(M_{23}^{11} + M_{32}^{11}\right)x^2x^3, \\ \sigma^{22} &= N^{22} + M_3^{22}x^3 + M_1^{22}x^1 + \left(M_{31}^{22} + M_{13}^{22}\right)x^3x^1, \\ \sigma^{33} &= N^{33} + M_1^{33}x^1 + M_2^{33}x^2 + \left(M_{12}^{33} + M_{21}^{33}\right)x^1x^2, \\ \sigma^{12} &= N^{12} + M_3^{12}x^3, \quad \sigma^{13} = N^{13} + M_2^{13}x^2, \quad \sigma^{23} = N^{23} + M_1^{23}x^1.\end{aligned}\tag{2.43}$$

З урахуванням (2.43), вираз для гіпотези (2.29) при застосуванні (в термінології) (в позначеннях) моментів напружень набуває наступного вигляду:

$$\left(\frac{\partial \sigma^{11}}{\partial x^1}\right)_0 = M_1^{11} = 0, \quad \left(\frac{\partial^2 \sigma^{11}}{\partial x^1 \partial x^\alpha}\right)_0 = M_{1\alpha}^{11} = 0.\tag{2.44}$$

Для забезпечення дотримання гіпотези (2.44), а також з метою уникнення порушення закону Гука для компоненти  $\varepsilon_{11}$  мають бути введені додаткові члени  $\varphi_{11}^1$  и  $\psi_{11}^{1\alpha}$  (які за формальною ознакою є сталими інтегрування)

$$\varepsilon_{11} = \zeta_{11} + \varphi_{11}^1 x^1 + \varphi_{11}^2 x^2 + \varphi_{11}^3 x^3 + \left(\psi_{11}^{23} + \psi_{11}^{32}\right)x^2x^3 + \psi_{11}^{12}x^1x^2 + \psi_{11}^{13}x^1x^3.\tag{2.45}$$

Тоді для моментів напружень  $M_\alpha^{ij}$  и  $M_{\alpha\mu}^{ij}$  залишаються чинними співвідношення (2.40 ... 2.42), а для моментів  $M_I^{\alpha\beta}$ ,  $M_{I\beta}^{\alpha\alpha}$ ,  $M_I^{II}$  і  $M_{1\beta}^{11}$  враховуємо величини  $\varphi_{11}^I$  и  $\psi_{11}^{I\beta}$ . Застосуванням відкоригованого виразу (2.45) і гіпотези (2.44) отримаємо:

$$M_1^{\alpha\beta} = C^{\alpha\beta\gamma\mu}\varphi_{\gamma\mu}^1 + C^{\alpha\beta 11}\varphi_{11}^1,\tag{2.46}$$

$$M_{1\beta}^{\alpha(\alpha)} = C^{\alpha(\alpha\alpha\alpha)}\psi_{(\alpha\alpha)}^{1\beta} + C^{\alpha(\alpha)11}\psi_{11}^{11}, \quad (\alpha \neq \beta),\tag{2.47}$$

$$M_1^{11} = C^{11\alpha\beta}\varphi_{\alpha\beta}^1 + C^{1111}\varphi_{11}^1 = 0,\tag{2.48}$$

$$M_{1\beta}^{11} = C^{11(\alpha\alpha)}\psi_{(\alpha\alpha)}^{1\beta} + C^{1111}\varphi_{11}^{1\beta} = 0.\tag{2.49}$$

З вищеперелічених співвідношень (2.48-2.49) визначаються вирази для додатково введених моментів деформацій

$$\varphi_{11}^1 = -\frac{C^{11\alpha\beta}}{C^{1111}}\varphi_{\alpha\beta}^1,\tag{2.50}$$

$$\varphi_{11}^1 = -\frac{C^{11(\alpha\alpha)}}{C^{1111}} \psi_{(\alpha\alpha)}^{1\alpha}, \quad (\alpha \neq \beta). \quad (2.51)$$

За результатами підстановки (2.50) в (2.46) і (2.51) в (2.47) отримаємо

$$M_{1\beta}^{\alpha\beta} = B^{\alpha\beta\gamma\mu} \varphi_{\gamma\mu}^1, \quad (2.52)$$

$$M_{1\beta}^{\alpha(\alpha)} = B^{\alpha(\alpha\alpha)} \psi_{(\alpha\alpha)}^{1\beta}, \quad (\alpha \neq \beta), \quad (2.53)$$

$$B^{\alpha\beta\gamma\mu} = C^{\alpha\beta\gamma\mu} \frac{C^{\alpha\beta 11} C^{11\gamma\mu}}{C^{1111}}. \quad (2.54)$$

Слід зазначити, що коригування тензора пружних констант (2.54) стосується виключно старших моментів напружень і деформацій, які при оцінці асимптотичної точності апроксимації зазвичай не враховуються.

### 2.3 Загальний алгоритм розв'язання задач динаміки оболонкових конструкцій

Вихідним співвідношенням, яке визначає динамічну поведінку довільної механічної системи, зокрема ЗО, є варіаційний принцип Гамільтона – Остроградського, який може бути наведений в наступному вигляді [20]:

$$\int_{t_1}^{t_2} \delta(T - V) dt + \int_{t_1}^{t_2} \delta W_{nc} dt = 0, \quad (2.55)$$

де:  $T$  – загальна кінетична енергія системи;  
 $V$  – потенціальна енергія системи, яка включає як енергію деформації, так і потенціал будь-яких консервативних зовнішніх сил;  
 $W_{nc}$  – робота неконсервативних сил, які діють на систему, включаючи згасання та інші довільні зовнішні навантаження;  
 $\delta$  – варіація для часового інтервалу, який розглядається.

#### 2.3.1 МСЕ-співвідношення для варіації кінетичної енергії системи

Згідно положенням загальної фізики кінетична енергія системи дорівнює

$$T = \frac{1}{2} m v^2 = \frac{1}{2} m \left( \frac{du}{dt} \right)^2, \quad (2.56)$$

Здійснивши підстановку виразу для кінетичної енергії в перший доданок формули (2.55), отримаємо для зазначеного доданка наступний вираз

$$\int_{t_1}^{t_2} \delta T dt = \int_{t_1}^{t_2} [mv\delta v] dt = mv\delta u \Big|_{t_1}^{t_2} - \int_{t_1}^{t_2} \left[ m \left( \frac{dv}{dt} \right) \delta u \right] dt = mv\delta u \Big|_{t_1}^{t_2} - \int_{t_1}^{t_2} [ma\delta u] dt , \quad (2.57)$$

де  $\delta v = d(\delta u)/dt$  – варіація швидкості маси  $m$ ;

$a = dv/dt$  – лінійне прискорення маси  $m$ .

Оскільки, згідно принципу Гамільтона – Остроградського (2.55) (див. [20]) варіація  $\delta u$  дорівнює нулю для моментів часу, які є межами інтегрування  $t_1$  і  $t_2$ , то передостанній доданок в співвідношенні (2.57) також дорівнюватиме нулю. Тобто

$$mv\delta u \Big|_{t_1}^{t_2} = 0 . \quad (2.58)$$

В підсумку маємо наступний вираз для варіації кінетичної енергії системи

$$\int_{t_1}^{t_2} \delta T dt = - \int_{t_1}^{t_2} [ma\delta u] dt . \quad (2.59)$$

Вираз для варіації кінетичної енергії скінченого елемента має наступний вигляд

$$\delta T_{FE} = \rho \int_{x^1} \int_{x^2} \int_{x^3} \sqrt{g} \cdot \ddot{u}^b \delta u^b dx^1 dx^2 dx^3 . \quad (2.60)$$

де  $u^b$  – компоненти вектора переміщень точок СЕ;

$\ddot{u}^b$  – компоненти вектора прискорень точок СЕ,

$\rho$  – густина матеріалу СЕ;

$FE$  – скорочення англомовного словосполучення «finite element».

Для отримання виразу для варіації кінетичної енергії системи за методологією МСЕ застосуємо для прискорень точок СЕ апроксимацію однорідними поліномами Лагранжа аналогічно до апроксимації переміщень (див.(2.32))

$$\ddot{u}^b = \sum_{p_1} \sum_{p_2} \sum_{p_3} \prod_{k=1}^3 \left( p_{(k)} x^{(k)} + \frac{1}{2} \right) \ddot{U}_{p_1 p_2 p_3}^b , \quad (2.61)$$

де  $\ddot{U}_{p_1 p_2 p_3}^b$  – прискорення вузлових точок скінченого елемента (Рис. 2.2)

Для зручності здійснення подальших математичних перетворень, наведемо запис виразів (2.32) і (2.61) у вигляді рядів Маклорена в місцевій системі координат

$$u^b = u_{(0)}^b + u_i^b x^i + u_{ij}^b x^i x^j + u_{ijk}^b x^i x^j x^k , \quad (2.62)$$

$$\ddot{u}^{b'} = \ddot{u}_{(0)}^{b'} + \ddot{u}_i^{b'} x^i + \ddot{u}_{ij}^{b'} x^i x^j + \ddot{u}_{ijk}^{b'} x^i x^j x^k, \quad (2.63)$$

де

$$\begin{aligned} u_{(0)}^{b'} &= \frac{1}{8} \sum_{p_1} \sum_{p_2} \sum_{p_3} U_{p_1 p_2 p_3}^{b'}, \\ u_i^{b'} &= \frac{1}{4} \sum_{p_1} \sum_{p_2} \sum_{p_3} p_i \cdot U_{p_1 p_2 p_3}^{b'}, \\ u_{ij}^{b'} &= \delta_{(j)}^{(i)} \frac{1}{2} \sum_{p_1} \sum_{p_2} \sum_{p_3} p_i p_j \cdot U_{p_1 p_2 p_3}^{b'}, \\ u_{ijk}^{b'} &= \delta_{(j)}^{(i)} \delta_{(k)}^{(i)} \sum_{p_1} \sum_{p_2} \sum_{p_3} p_i p_j p_k \cdot U_{p_1 p_2 p_3}^{b'}. \end{aligned} \quad (2.64)$$

Відповідні коефіцієнти для ряду (2.63) матимуть вираз аналогічний коефіцієнтам (2.64) для ряду (2.62).

Отримані вирази для прискорень (2.64) і переміщень (2.63) точок СЕ підставимо в (2.60) і виконаємо операцію інтегрування в межах об'єму СЕ. Така операція, зважаючи на пологість оболонки в межах одного скінченого елемента (див. [42-144]), може бути здійснена в явному вигляді (без застосування чисельного інтегрування по об'єму СЕ).

Після виконання зазначених операцій вираз для варіації кінетичної енергії (2.60) матиме наступний вигляд

$$\delta T_{FE} = \sum_{p_1} \sum_{p_2} \sum_{p_3} \sum_{k_1} \sum_{k_2} \sum_{k_3} M_{p_1 p_2 p_3 k_1 k_2 k_3}^{b' f'} \dot{U}_{k_1 k_2 k_3}^{f'} \delta U_{p_1 p_2 p_3}^{b'}, \quad (2.65)$$

де коефіцієнти узгодженої (согласованої) матриці мас  $M_{p_1 p_2 p_3 k_1 k_2 k_3}^{b' f'}$  визначаються наступним чином

$$\begin{aligned} M_{p_1 p_2 p_3 k_1 k_2 k_3}^{b' f'} &= \delta_{(f')}^{(b')} \rho \sqrt{g} \left[ \frac{1}{64} + \frac{p_k k_k}{192} + \frac{1}{576} (p_1 k_1 p_2 k_2 + p_1 k_1 p_3 k_3 + \right. \\ &\quad \left. + p_2 k_2 p_3 k_3) + \frac{1}{1728} p_1 p_2 p_3 k_1 k_2 k_3 \right]. \end{aligned} \quad (2.66)$$

### 2.3.2 МСЕ-співвідношення для варіації потенціальної енергії системи

Варіація потенціальної енергії системи в виразі (2.55) може бути математично

деталізована наступним чином

$$\int_{t_1}^{t_2} \delta V dt = \int_{t_1}^{t_2} \sum_{FE} (\delta W_{FE} - \delta A_{FE}) dt , \quad (2.67)$$

де:  $\delta W_{FE}$  – віртуальна робота внутрішніх сил (варіація енергії деформування) СЕ;

$\delta A_{FE}$  – віртуальна робота (варіація роботи) зовнішніх сил, які діють на СЕ;

Процедура інтегрування виразу для віртуальної роботи зовнішніх сил є звичайною для МСЕ і має вигляд:

- для об'ємних навантажень, які замінюються еквівалентною системою зосереджених сил в вузлах скінчених елементів:

$$\delta A_{FE-V} = \int_{V_{FE}} P^{i'} \delta u^{i'} dV_{FE} = \sum_{FE} \sum_{k=1}^8 P_{(k),V}^{i'} \delta u_{(k)}^{i'} , \quad (2.68)$$

- для поверхневих навантажень (по граням СЕ), які замінюються еквівалентною системою зосереджених сил в вузлах відповідних граней СЕ:

$$\delta A_{FE-S} = \int_{S_{FE}} P^{i'} \delta u^{i'} dS_{FE} = \sum_{FE} \sum_{k=1}^4 P_{(k),S}^{i'} \delta u_{(k)}^{i'} , \quad (2.69)$$

- для зосереджених сил (в вузлах СЕ):

$$\delta A_{FE-N} = \int_{N_{FE}} P^{i'} \delta u^{i'} dN_{FE} = \sum_{FE} \sum_{k=1}^8 P_{(k),N}^{i'} \delta u_{(k)}^{i'} , \quad (2.70)$$

Розглянемо тензор напружень в матеріалі як суму двох складових

$$\sigma^{ij} = \sigma_0^{ij} + \sigma_p^{ij} , \quad (2.71)$$

де  $\sigma_0^{ij}$  – напруження в матеріалі, накопичені до початку процесу навантаження, який моделюється (переднапруження);  
 $\sigma_p^{ij}$  – напруження в матеріалі, накопичені в процесі навантаження, який моделюється.

В загальному випадку варіація енергії деформацій скінченого елемента з урахуванням співвідношень (2.12), (2.23) і (2.71) дорівнює

$$\begin{aligned}
\delta W_{FE}^* &= \int_V \sigma^{ij} \delta \varepsilon_{ij} dV = \int_V (\sigma_0^{ij} + \sigma_p^{ij}) \delta (\bar{\varepsilon}_{ij} + \tilde{\varepsilon}_{ij}) dV = \\
&= \int_V \sigma_0^{ij} \delta (\bar{\varepsilon}_{ij} + \tilde{\varepsilon}_{ij}) dV + \int_V C^{ijkl} (\bar{\varepsilon}_{kl} + \tilde{\varepsilon}_{kl}) \delta (\bar{\varepsilon}_{ij} + \tilde{\varepsilon}_{ij}) dV = \\
&= \delta W_1 + \delta W_2 + \delta W_3 + \delta W_4 + \delta W_5 + \delta W_6,
\end{aligned} \tag{2.72}$$

де

$$\begin{aligned}
\delta W_1 &= \int_V \sigma_0^{ij} \delta \bar{\varepsilon}_{ij} dV, \quad \delta W_2 = \int_V C^{ijkl} \bar{\varepsilon}_{kl} \delta \bar{\varepsilon}_{ij} dV, \quad \delta W_3 = \int_V \sigma_0^{ij} \delta \tilde{\varepsilon}_{ij} dV, \\
\delta W_4 &= \int_V C^{ijkl} \bar{\varepsilon}_{kl} \delta \tilde{\varepsilon}_{ij} dV, \quad \delta W_5 = \int_V C^{ijkl} \tilde{\varepsilon}_{kl} \delta \bar{\varepsilon}_{ij} dV, \quad \delta W_6 = \int_V C^{ijkl} \tilde{\varepsilon}_{kl} \delta \tilde{\varepsilon}_{ij} dV.
\end{aligned} \tag{2.73}$$

Зазначимо, що доданки  $\delta W_1$  і  $\delta W_3$  в виразі (2.72) можуть бути виключені із розгляду, оскільки вони пов'язані з напруженнями, які накопичені до початку процесу навантаження, який моделюється (див. (2.71)), і урівноважені зовнішніми навантаженнями, які діють на об'єкт в зазначеному стані.

Зважаючи на вимоги в п. 4.1.7 нормативного документу ПНАЭ Г-10-007-89 [131] (див. розділ 1.2 вище) проектні і перевірні розрахунки НДС і працездатності ЗО (зважаючи на наведені в ПНАЭ Г-10-007-89 [131] посилання на загальнобудівельні НД) мають виконуватись, виходячи з припущення про лінійний характер деформування споруди. Як наслідок, доданки  $\delta W_4$ ,  $\delta W_5$  і  $\delta W_6$  в виразі (2.72) можуть бути виключені із розгляду, оскільки вони містять складові тензора деформацій, які залежать від нелінійних членів третього і четвертого ступеню відносно функцій переміщень (в цій роботі – переміщень вузлів скінчених елементів).

Таким чином, в припущенням малості переміщень, будемо розглядати лише лінійну, неврівноважену початковими зовнішніми навантаженнями, складову варіації енергії деформації скінченого елемента –  $\delta W_2$ .

Для отримання складових варіації енергії деформації скінченого елемента  $\delta W_2$  (1.62) як функції переміщень вузлів СЕ підставимо вираз для деформацій і напружень, наведені в формі МССЕ, (2.37), (2.43), (2.44) і (2.46), (2.47) в (2.73) і, з урахуванням (2.4), здійснимо інтегрування по місцевим координатам в межах об'єму скінченого елемента від  $x^i = -0.5$  до  $x^i = +0.5$ . Інтегрування виконаємо в

явному вигляді, оскільки за умови пологості скінченого елемента визначник метричного тензора  $g$  і пружні сталі  $C^{ijkl}$  в межах об'єму СЕ можуть вважатись незмінними.

За результатами підстановок і інтегрування вираз (2.72) з урахуванням симетрії тензора  $C^{ijkl}$  (2.24), (2.25) матиме вигляд

$$\begin{aligned} \delta W_{FE}^* = \delta W_2 &= \sum_{s_1} \sum_{s_2} \sum_{s_3} \sum_{p_1} \sum_{p_2} \sum_{p_3} \sqrt{g} \cdot C^{ijkl} \left[ \frac{1}{16} C_{j0}^{b'} C_{l0}^{t'} s_i p_k + \right. \\ &+ \frac{1}{48} C_{js(m)}^{b'} C_{lp(m)}^{t'} s_i s_m p_k p_m \omega_{(ijkl)}^{(mmmm)} + \\ &\left. + \frac{1}{288} C_{js(m)s(n)}^{b'} C_{lp(m)p(n)}^{t'} s_i s_m s_n p_k p_m p_n \delta_{(j)}^{(i)} \delta_{(l)}^{(k)} \delta_{(k)}^{(i)} \omega_{(mmn)}^{(nni)} \right] \cdot U_{s_1 s_2 s_3}^{b'} \delta U_{p_1 p_2 p_3}^{t'}, \end{aligned} \quad (2.74)$$

В співвідношенні (2.74) може бути виділений математичний вираз для коефіцієнтів матриці жорсткості СЕ –  $K_{p_1 p_2 p_3 k_1 k_2 k_3}^{b' f'}$  – який має наступний вигляд

$$\begin{aligned} K_{p_1 p_2 p_3 k_1 k_2 k_3}^{b' f'} &= \sum_{s_1} \sum_{s_2} \sum_{s_3} \sum_{p_1} \sum_{p_2} \sum_{p_3} \sqrt{g} \cdot C^{ijkl} \left[ \frac{1}{16} C_{j0}^{b'} C_{l0}^{t'} s_i p_k + \right. \\ &+ \frac{1}{48} C_{js(m)}^{b'} C_{lp(m)}^{t'} s_i s_m p_k p_m \omega_{(ijkl)}^{(mmmm)} + \\ &\left. + \frac{1}{288} C_{js(m)s(n)}^{b'} C_{lp(m)p(n)}^{t'} s_i s_m s_n p_k p_m p_n \delta_{(j)}^{(i)} \delta_{(l)}^{(k)} \delta_{(k)}^{(i)} \omega_{(mmn)}^{(nni)} \right] \end{aligned} \quad (2.75)$$

В співвідношеннях (2.74), (2.75) при  $m=1$  або  $n=1$  компоненти тензора  $C^{\alpha\nu\beta\mu}$  замінюються на компоненти тензора  $B^{\alpha\nu\beta\mu}$  згідно (2.54).

### 2.3.3 Особливості врахування варіації роботи неконсервативних сил

Як зазначено вище (див. розділ 2.3.2 вище) проектні і перевірні розрахунки НДС і працездатності ЗО посилання на загальнобудівельні НД мають виконуватись, виходячи з припущення про лінійний характер деформування споруди.

В той же час наявність неконсервативних сил, які діють на систему, таких, як згасання, тертя, реакції однобічних в'язей є факторами, які призводять до нелінійного характеру деформування об'єкта.

Зважаючи на вищевикладене, з метою дотримання вимог НД щодо

використання в проектних і перевірних розрахунках НДС і працездатності ЗО виключно лінійних моделей деформування конструкцій в цій роботі вплив неконсервативних сил на досліджуваний об'єкт – ЗО енергоблоку АЕС – не враховується.

Окрім того слід зазначити, що для розрахунків НДС і динамічної поведінки ЗО при сейсмічному впливі в якості вихідної інформації про розрахункове динамічне навантаження приймалась синтезована поверхова трикомпонентна акселерограма (згенерована за результатами довишукувань сейсмічної небезпеки на майданчику АЕС для позначки верху опорної плити ЗО (див. [145]).

Обрана для розрахунків акселерограма згенерована для коефіцієнту демпфування (параметру загасання) коливань  $\xi$ , який дорівнює 4% від критичного. Таке значення розрахункового коефіцієнту демпфування відповідає нормативним і проектним вимогам, зокрема наступній вимозі в п. 3.11 ПНАЭ Г-5-006-87 [130] (див. також розділ 1.2 вище), застосованою для залізобетонної споруди ЗО – «... При расчете сооружений, систем, элементов величины логарифмических декрементов колебаний ... следует принимать для железобетонных конструкций 0.25 ...».

Коефіцієнт демпфування (параметр загасання) коливань  $\xi$ , який враховує зовнішній опір руху та/або внутрішнє «тертя» в матеріалі тощо) для випадку малого опору пов'язаний з логарифмічним декрементом коливань  $\delta$  наступним співвідношенням (див. [20], сс. 42-46):

$$\delta = 2\pi\xi\sqrt{1-\xi^2} \text{ або для } \delta = 0.25 - \xi = \frac{\delta}{\sqrt{\delta^2 - 4\pi^2}} = 4\% . \quad (2.76)$$

Таким чином, вплив неконсервативних сил – коефіцієнт демпфування коливань  $\xi$  – неявним чином (інтегрально) враховується при моделюванні НДС і динамічної поведінки ЗО. Зазначений підхід, щодо неявного інтегрального врахування фактору демпфування коливань надає змогу для випадку аналізу НДС, динамічної поведінки і працездатності ЗО в умовах дії сейсмічного впливу відмовитись від визначення і безпосереднього врахування в системі розв'язуючих рівнянь МСЕ матриці демпфування (застосувавши неявне врахування зазначеного фактора).

Також на користь прийнятності обраного підходу свідчать наступні доводи:

- 1) Метою розрахункового дослідження в цій роботі, зокрема, є консервативне визначення максимального розрахункового рівня інтенсивності напружень, який може виникнути в сталевому гермооблицюванні ЗО при динамічному (сейсмічному) впливі на споруду. При безпосередньому (явному) врахуванні фактору демпфування коливань в рівняннях МСЕ амплітуди коливань точок об'єкту (ЗО) і, відповідно, деформації і напруження в загальному випадку будуть нижчими, ніж у випадку альтернативного (неявного) врахування зазначеного фактору або його повного неврахування. Тобто, реалізоване в цій роботі в розрахунках НДС і динамічної поведінки ЗО неявне врахування або можливе повне неврахування фактору демпфування забезпечує більший консерватизм розрахунків (більш високий розрахунковий рівень інтенсивності напружень), порівняно із випадком безпосереднього (явного) врахування фактору демпфування коливань.
- 2) Виходячи з задекларованої вище мети (консервативного визначення максимального розрахункового рівня інтенсивності напружень), і, відповідно, відсутності необхідності моделювання вимушених коливань ЗО до моменту повного їх згасання застосований підхід, щодо неявного інтегрального врахування фактору демпфування коливань може вважатись цілком прийнятним для «верхньої» оцінки параметрів НДС і працездатності ГСО при динамічному (сейсмічному) впливі на споруду.

#### **2.3.4 МСЕ-рівняння руху конструкції при динамічних впливах**

Зважаючи на вищевикладене в розділі 2.3, варіаційний принцип Гамільтона – Остроградського в співвідношенні (2.55) з урахуванням (2.67) застосовно до задач цього дослідження може бути наведений в наступному вигляді

$$\int_{t_1}^{t_2} \left( \sum_{FE} \delta T_{FE} - \sum_{FE} \delta W_{FE} + \sum_{FE} \delta A_{FE} \right) dt = 0 , \quad (2.77)$$

З урахуванням виразів (2.65), (2.68)-(2.70) і (2.74) в припущення про довільність варіації переміщень  $\delta u$  умова рівності нулю лівої частини співвідношення (2.77) набуває вигляду наступного вихідного співвідношення, яке

описує пружну динамічну поведінку конструкції, в цій роботі – МСЕ-моделі ЗО

$$[M]\{\ddot{u}\} + [K]\{\dot{u}\} = \{P(t)\}, \quad (2.78)$$

- де:  $[M]$ ,  $[K]$  – матриці мас і жорсткості МСЕ-моделі;
- $\{\ddot{u}\}$ ,  $\{\dot{u}\}$  – вектори вузлових прискорень і переміщень МСЕ-моделі;
- $\{P(t)\}$  – вектор вузлових навантажень МСЕ-моделі;
- $t$  – час.

### 2.3.5 Застосування редукційованої системи руху конструкції при динамічних впливах

Згідно [146, 130] (див. також розділ 1.2 вище) для оцінки і обґрунтування сейсмостійкості будівель і споруд застосовуються:

- статичний метод розрахунку на сейсмостійкість;
- лінійно-спектральний метод розрахунку на сейсмостійкість;
- метод динамічного аналізу сейсмостійкості.

Дослідження динамічної поведінки ЗО в цій роботі фактично здійснювався методом прямого динамічного аналізу шляхом розв'язання системи рівнянь руху МСЕ-моделі (2.78) «в головних координатах». Згідно методології, викладеній, зокрема, в [20] в якості «головних координат» приймається обмежена сукупність форм власних коливань МСЕ-моделі ЗО. Зазначений підхід забезпечив можливість глибокої редукції (суттевого зменшення розмірності) системи рівнянь (2.76) розмірністю  $N$ , за рахунок переходу до згаданої нової системи узагальнених невідомих («головних координат»)  $\{q\}$  розмірністю  $n \ll N$ , а саме:

$$\{u\} = [B]\{q\}, \quad (2.79)$$

Відповідно, система рівнянь МСЕ (2.76) прийме вигляд (2.80)-(2.81):

$$[B]^T [M][B]\{\ddot{q}\} + [B]^T [K][B]\{\dot{q}\} = [B]^T \{P(t)\}, \quad (2.80)$$

$$[m]\{\ddot{q}\} + [k]\{\dot{q}\} = \{p(t)\}, \quad (2.81)$$

З урахуванням властивості ортогональності прийнятої системи базисних векторів – форм власних коливань МСЕ-моделі  $[B]$  (див. [20]) – матриці  $[m]$  і  $[k]$  (мас і жорсткості редукційованої МСЕ-моделі) будуть мати діагональну структуру. Як наслідок, система рівнянь (2.81) розмірністю  $n$ , розпадеться на  $n$  незалежних

лінійних диференціальних неоднорідних рівнянь другого порядку, які відображають процес вимушених коливань МСЕ-моделі по окремим, прийнятим в якості нового базису, головним (узагальненим) координатам в межах часового інтервалу, який розглядається,  $t_1 \leq t \leq t_2$  (кроку часу  $\Delta t = t_2 - t_1$ ), а саме:

$$m_i \ddot{q}_i + k_i q_i = p_i(t) , \quad (2.82)$$

$$\text{де: } p_i(t) = p_i(t_1) + \frac{p_i(t_2) - p_i(t_1)}{t_2 - t_1} (t - t_1) = C_i(t - t_1) + D_i = C_i \tau + D_i = p_i(\tau) , \quad (2.83)$$

$$t_1 \leq t \leq t_2 , \Delta t = t_2 - t_1 , \tau = \tau(t) = t - t_1 , \tau(t_1) = 0 , \tau(t_2) = \Delta t , 0 \leq \tau \leq \Delta t ,$$

$$D_i = p_i(t_1) = p_i(\tau_1) = p_i(0) , C_i = \frac{p_i(t_2) - p_i(t_1)}{t_2 - t_1} = \frac{p_i(\Delta t) - p_i(0)}{\Delta t} . \quad (2.84)$$

Функція-розв'язок окремого диференціального рівняння, яке є компонентом системи (2.82), являє собою суму загального  $q_i^0(\tau)$  і часткового  $q_i^*(\tau)$  рішень і визначаються згідно стандартній процедурі, викладеній в [147, 20]:

$$q_i(\tau) = q_i^0(\tau) + q_i^*(\tau) , \quad (2.85)$$

$$q_i^0(\tau) = A_i \sin \omega_i \tau + B_i \cos \omega_i \tau , \quad (2.86)$$

$$\dot{q}_i^0(\tau) = A_i \omega_i \cos \omega_i \tau + B_i \omega_i \sin \omega_i \tau , \quad (2.87)$$

$$A_i = [\dot{q}_i(0) - C_i / k_i] / \omega_i , \quad (2.88)$$

$$B_i = q_i(0) - D_i / k_i , \quad (2.89)$$

$$q_i^*(\tau) = (C_i \tau + D_i) / k_i , \quad (2.90)$$

Отримані узагальнені переміщення  $q_i(\Delta t)$  і швидкості  $\dot{q}_i(\Delta t)$  редукованої МСЕ-моделі, для моменту часу, який відповідає кінцю інтервалу часу  $\tau(t_2) = \Delta t$ , є початковими умовами для моделювання руху редукованої моделі на наступному кроці часу. За необхідності (виходячи з розміру інтервалу часу, прийнятого для «моніторингу»), в кінці кроку часу  $\Delta t$  згідно формулі (2.79) виконується обчислення вузлових переміщень, швидкостей, прискорень, а також параметрів НДС СЕ вихідної МСЕ-моделі, а саме:

$$\{u(t_2)\} = [B] \{q(t_2)\} , \{u(t_2)\} = [B] \{\dot{q}(t_2)\} , \{u(t_2)\} = [B] \{\ddot{q}(t_2)\} . \quad (2.91)$$

### **2.3.6 Загальний алгоритм аналізу динамічної поведінки і НДС конструкцій**

Згідно до методології, математично викладеної в попередніх підрозділах, для виконання досліджень цієї роботи був практично реалізований наступний загальний алгоритм (процедура) МСЕ-аналізу динамічної поведінки і НДС ЗО, зокрема для випадку стрибка тиску в гермооб'ємі і наступному впливі проектного землетрусу або ударної повітряної хвилі від вибуху повітряно-водневої суміші в підоболонковому просторі:

- 1) Визначення динамічних характеристик конструкцій – частот и форм власних коливань;
- 2) Визначення НДС конструкції, яке відповідає формам власних коливань;
- 3) Визначення суттєво збуджуваних (енергетично ємних) форм власних коливань конструкції притаманних заданій конфігурації силових динамічних впливів (базису редукції), а також амплітуд коливань по зазначеним формам;
- 4) Побудова матриць мас і жорсткості редуційованої МСЕ-моделі конструкції;
- 5) Моделювання динамічної поведінки редуційованої МСЕ-моделі конструкції, а також – з наперед заданим «моніторинговим» часовим інтервалом – динамічного стану вихідної МСЕ-моделі конструкції (вузлових переміщень, швидкостей, прискорень, параметрів НДС СЕ);
- 6) Аналіз можливості/неможливості відмови конструкції при поточній конфігурації силових динамічних впливів (зокрема, аналіз можливості/неможливості втрати локалізуючої функції ЗО по критерію збереження суцільності герметизуючого сталевого облицювання).

### **2.4 Висновки по розділу 2**

1 Зважаючи на особливості конструкції і умови функціонування ЗО – наявність зон нерегулярної геометрії об'єкта (отворів, місцевих потовщень, зламів поверхні тощо), неоднорідну структуру матеріалу споруди по товщині її стінки , складний характер проектних навантажень на споруду (за номенклатурою впливів, функцією зміни інтенсивностей навантажень в просторі і часі тощо) – для моделювання НДС і динамічної поведінки ЗО було обрано метод скінчених

елементів, якому притаманні інженерна наочність, можливість необхідного ступеню деталізації розрахункових моделей, алгоритмічність, позитивний досвід застосування, ефективність тощо.

2 Моделювання досліджуваного об'єкту – НДС і динамічної поведінки ЗО – здійснюється за допомогою апробованої модифікації методу скінчених елементів, а саме – моментної схеми скінчених елементів.

3 Для моделювання НДС і динамічної поведінки ЗО обрано ізопараметричний СЕ, в якому для апроксимації переміщень застосовуються ті ж самі вузлові точки і ті ж самі функції форми (полілінійний закон Лагранжа), що і для апроксимації координат. Для СЕ, якими моделюється НДС суттєво оболонкових фрагментів ЗО (ГСО), реалізована гіпотеза про сталість напружень обтиснення в напрямку товщини фрагменту (СЕ). Інші гіпотези щодо НДС оболонкових (тонкостінних) конструкцій, порівняно з об'ємним (тривимірним) тілом, не застосовуються.

4 На основі варіаційного принципу Гамільтона – Остроградського, який визначає динамічну поведінку довільної механічної системи, зокрема ЗО, отримано співвідношення для системи розв'язуючих рівнянь руху ЗО в матричній формі.

5 Для обраних до застосування типів СЕ на основі співвідношень тривимірної теорії пружності і обраних апроксимуючих функцій отримані співвідношення для коефіцієнтів узгодженої (согласованої) матриці мас і матриці жорсткості СЕ.

6 Для дослідження динамічної поведінки ЗО фактично був застосований метод прямого динамічного аналізу шляхом розв'язання системи рівнянь руху МСЕ-моделі «в головних координатах». В якості «головних координат» приймалася обмежена сукупність форм власних коливань МСЕ-моделі ЗО. Зазначений підхід забезпечив глибоку редукцію (суттєве зменшення розмірності) вихідної системи рівнянь МСЕ за рахунок переходу до нової системи узагальнених невідомих («головних координат»).

7 Застосовано підхід, щодо неявного інтегрального врахування фактору демпфування коливань, який надав змогу для випадку аналізу НДС, динамічної поведінки і працездатності ЗО в умовах дії сейсмічного впливу відмовитись від

визначення і безпосереднього врахування в системі розв'язуючих рівнянь МСЕ матриці демпфування (внаслідок неявного врахування зазначеного фактора).

8 Розроблений і практично реалізований загальний алгоритм (процедура) МСЕ-аналізу динамічної поведінки і НДС ЗО, зокрема для випадку стрибка тиску в гермооб'ємі і наступному впливі проектного землетрусу або ударної повітряної хвилі від вибуху повітряно-водневої суміші в підоболонковому просторі.

9 В процесі МСЕ-моделювання динамічної поведінки і НДС ЗО через наперед заданий інтервал часу здійснюється аналіз можливості/неможливості відмови конструкції при поточній конфігурації силових динамічних впливів (зокрема, аналіз можливості/неможливості втрати локалізуючої функції ЗО по критерію збереження суцільності герметизуючого сталевого облицювання).

### РОЗДІЛ 3 РЕАЛІЗАЦІЯ ОБЧИСЛЮВАЛЬНИХ АЛГОРИТМІВ РОЗВ'ЯЗАННЯ РІВНЯНЬ ДИНАМІКИ ОБОЛОНКОВИХ КОНСТРУКЦІЙ В СКЛАДІ РОЗРОБЛЕНОГО ПРОГРАМНОГО ЗАСОБУ (ПЗ) «ДИПРОС»

Розроблена в цій дисертаційній роботі вищевикладена методологія моделювання НДС і динамічної поведінки тонкостінних оболонкових конструкцій, а також обчислювальні алгоритми розв'язання систем рівнянь руху досліджуваних об'єктів були програмно реалізовані у вигляді програмного засобу «ДИПРОС» («Динамика и прочность оболочечных систем»), скорочений опис якого наведений нижче.

#### **3.1 Призначення, характеристики і можливості ПЗ**

##### **3.1.1 Призначення і сфера застосування**

Програмний засіб «ДИПРОС» («Динамика и прочность оболочечных систем») призначений для виконання методом скінчених елементів (МСЕ) механіко-міцнісних, динамічних і оптимізаційних розрахунків складних пластинчато-оболонкових конструкцій на ЕОМ. ПЗ має широкі прикладні можливості і покликаний сприяти автоматизації, інтелектуалізації і підвищенню ефективності процесів проектування і дослідження напружено-деформованого стану тонкостінних просторових систем. Його застосування, зокрема, дозволяє:

- A) в наукових дослідженнях:
  - розробляти нові і включати в склад ПЗ альтернативні типи СЕ, моделі деформівних середовищ, закони стану матеріалів, методи розв'язання лінійних і нелінійних задач механіки твердого тіла, алгоритми оптимізації конструкцій тощо;
  - оцінювати достовірність і ефективність нових та існуючих методик дослідження НДС пластин і оболонок, розвинутих незалежно від ПЗ;
  - створювати експертні системи для механіко-міцнісного аналізу конструкцій і розробки рекомендацій щодо їх вдосконалення відповідно до заданих критеріїв;
  - розширювати можливості існуючих обчислювальних систем шляхом включення в них ПЗ або утворюючих його компонентів як ієрархічно залежних ПЗ;
  - досліджувати НДС особливо складних і унікальних об'єктів, визначати

оптимальний порядок їх виготовлення, монтажу та експлуатації;

- генерувати орієнтовані на вузькі класи конструкцій і процесів спеціалізовані ПЗ, які, будучи підмножиною вихідного ПЗ, потребують менший обсяг ресурсів ЕОМ і тому є більш простими, зручними і ефективними в експлуатації;

**Б) в проектній справі:**

- зменшити витрату матеріалів і вивільнити експериментальне обладнання за рахунок заміни витратних натурних випробувань дослідженням на ЕОМ імітаційних моделей;

- виявити фізико-механічні особливості конструкції, зони критичних напружень і деформацій, оцінити вплив недосконалостей і нерегулярностей структури на міцність і стійкість як окремих елементів виробу, так і його несучу здатність в цілому;

- спростити різноманітні розрахунки на міцність однотипних об'єктів шляхом створення параметризованої моделі, яка дозволяє, варіюючи обмеженою кількістю параметрів (констант), визначати загальні характеристики всього різноманіття варіантів;

- раціонально перерозподілити матеріал об'єкта з метою поліпшення його експлуатаційних властивостей і оптимізації технології виробничого процесу;

- підвищити ефективність проектних рішень, надійність і оптимальність окремих вузлів і всієї конструкції за рахунок застосування вдосконаленої методики розрахунку і отримання детальної картини НДС;

- обґрунтувати впровадження нових прогресивних рішень, що знижують матеріалоємність, терміни і витрати виготовлення виробів;

**В) в промисловому виробництві:**

- оперативно оцінювати можливість внесення в виріб конструктивних змін при дотриманні вимог (критеріїв) міцності і несучої здатності;

- дослідити вплив механічних і температурних факторів процесу виготовлення на НДС конструкції та її працездатність;

- розробити рекомендації щодо експлуатаційної придатності виробу, який внаслідок порушення технології та інших причин має геометричні, фізико-

механічні та/або конструктивні недосконалості;

Г) при експлуатації інженерних об'єктів :

- визначати міцнісні характеристики конструктивних елементів, які отримали в процесі експлуатації надмірні зміни форми, структури, умов закріплення; надавати висновок щодо можливості подальшого їх використання або необхідності їх заміни;

- розробляти і обґрунтовувати методики підсилення деталей і вузлів устаткування та інженерних об'єктів;

- оцінювати несучу здатність і поведінку конструкцій при виникненні умов роботи, не передбачених паспортно-технічними даними виробу, в аварійному режимі або в інший непривичні ситуації;

Д) в учебовому процесі:

- виконувати розрахункові роботи курсів «теорія пружності», «будівельна механіка», «механіка пластин та оболонок», «чисельні методи розрахунку просторових конструкцій» на основі застосування високоефективного ПЗ;

- ознайомити студентів та слухачів факультетів підвищення кваліфікації з методологією і практичною реалізацією механіко-міцнісних розрахунків на ЕОМ;

- надати уявлення про принципи побудови, функціонування та експлуатації структурних елементів систем автоматизованого проектування (САПР).

Конкретним практичним застосуванням комплексу може бути дослідження ПДВ, стійкості і динамічних характеристик таких інженерних об'єктів:

А) в машинобудуванні – камер згоряння двигунів, гідроциліндрів, обойм підшипників, деталей ланцюгових передач, полотен стрічкових і дискових пилок;

б) в будівництві – оболонок покріттів будівель і споруд, деталей трубопроводів, з'єднань патрубків, резервуарів для зберігання рідких і газоподібних речовин, оболонок силосів;

в) в суднобудуванні – елементів обшивки корпусів, перегородок, лопатей гребних гвинтів, оболонок глибоководних апаратів;

г) в приладобудуванні – корпусів приладів, посудин високого і низького тиску, тарілчастих пружин, механічних датчиків температури і тиску;

д) в електронній промисловості – пластинчастих кристалічних структур,

- оболонок мікросхем і транзисторів, плат електронних приладів, клейових з'єднань;
- е) в авіа- і ракетобудуванні – панелей обшивки літальних апаратів, обтічників, оболонок ракет і ракетних двигунів, елементів оперення;
  - ж) в автомобілебудуванні – кузовів, балок задніх мостів, маточин, корпусів коробок передач і інших агрегатів, ресор;
  - з) в енергомашинобудування – бандажів і лопаток газових і парових турбін, спіральних камер гідротурбін, елементів циліндрів високого та низького тиску турбоагрегатів.

Окремим компонентам ПЗ притаманні додаткові можливості, завдяки яким вони можуть застосовуватися як самостійно, так і разом з іншими програмними засобами. Детальніше про це сказано в п. 3.3.3.

ПЗ «ДИПРОС» призначений для використання науковцями, інженерами-розрахувачами, конструкторами, фахівцями з САПР, викладачами вишів, студентами і слухачами факультетів підвищення кваліфікації, програмістами.

### **3.1.2 Алгоритмічні мови програмування**

ПЗ «ДИПРОС» написаний в термінах алгоритмічної мови Fortran-77 за винятком двох сервісних підпрограм-функцій. Останні написані на асемблері і при розрахунках можуть бути заблоковані, оскільки не грають принципової ролі в обчислювальному процесі.

Вихідна розрахункова інформація може задаватися за бажанням користувача на проблемно-орієнтованій мові (ПОМ) і/або на алгоритмічній мові Fortran-77.

### **3.1.3 Типи ЕОМ для застосування ПЗ**

ПЗ «ДИПРОС» призначений для експлуатації на персональних ЕОМ в операційному середовищі (ОС) Microsoft Windows або ЕОМ інших типів під управлінням інших операційних систем, які підтримують функціонування компілятора алгоритмічної мови Fortran-77, відповідають іншим вимогам, викладеним в пп. 3.2.1 і 3.2.2 вимогам до технічного, математичного і програмного забезпечення.

### **3.1.4 Принципи побудови ПЗ**

З економічних міркувань великі обчислювальні системи мають бути:

- А) ефективними, тобто припускати можливість швидкого отримання очікуваних результатів при мінімальних витратах ресурсів;
- Б) довговічними, тобто здатними експлуатуватися протягом тривалого часу (порядку десятків років) з урахуванням зростаючих вимог до розрахункової продукції.

ПЗ «ДИПРОС» задовольняє цим умовам, оскільки з самого спочатку його розробка здійснювалась на основі наступних принципів і методів їх реалізації:

10 Універсальність. Здатність моделювання та дослідження широкого класу інженерних об'єктів і фізико-механічних процесів деформування; можливість застосування окремих компонентів, алгоритмів і програм комплексу автономно і в складі інших ПЗ.

11 Достовірність. Глибоке теоретичне обґрунтування прийнятих схем МСЕ, інших математичних методів і обчислювальних алгоритмів.

12 Мобільність. Незалежність від типів операційних систем і переносимість на різні види ЕОМ завдяки універсальній алгоритмічній мові програмування, проблемно-орієнтованим мовам користувача і можливості врахування техніко-системних обмежень обчислювального обладнання.

13 Незамкнутість. Відкритість щодо поліпшення комплексу, включення в нього нових моделей досліджуваних інженерних об'єктів і фізико-механічних процесів деформування; можливість розширення сфери застосування і спектра використовуваних математичних методів і алгоритмів; приступимість підключення спеціалізованих програм (генераторів сіток, графічних пакетів), а також модулів, орієнтованих на роботу з конкретними технічними засобами (графічними пристроями), що реалізують діалоговий режим роботи тощо.

14 Перешкодостійкість. Наявність засобів контролю і реагування програми на неправильні, неповні, суперечливі вихідні дані і на нереалізовані вимоги, а також наявність засобів відновлювання та продовження обчислювального процесу в разі збою обладнання або вимушеної переривання обчислень;

15 Висока пропускна здатність. Наявність засобів швидкого завдання

вхідних даних і керуючої інформації, високий ступінь автоматизації і швидкість проходження всіх етапів розрахунку, оптимізація процедури розрахунку, виходячи з доступних ресурсів ЕОМ, надання отриманих результатів в наочній формі, яка не потребує додаткової обробки.

16 Оптимальність формату надання інформації. Формат вхідної інформації обрано максимально зручним для користувача. Вона задається на ПОМ, має мінімальний обсяг, виключає суперечливість і неповноту опису завдання, проста за змістом і знайома по термінології інженеру-розрахувачу.

Оперативна інформація має відповідати вимогам повноти і мінімуму збережених (через економію потужності процесора) даних. Це протиріччя обумовило прийняття ретельно продуманого компромісного рішення.

Вихідна інформація максимально орієнтована на зручність користувача, має закінчену форму, надається в табличному і (або) графічному вигляді, не вимагає додаткової числової обробки і передбачає лише якісний аналіз.

17 Простота експлуатації. Вхідні дані та керуюча інформація описується на ПОМ в звичній інженеру термінології і в загальному випадку не вимагає спеціальних знань з основ методу розрахунку і програмування; виконання всіх проміжних етапів розрахунку здійснюється автоматизовано, але в той же час надає користувачу можливість керування обчислювальним процесом.

18 Простота обслуговування. ПЗ є автономним, орієнтованим на загальновживане математичне забезпечення, стандартну конфігурацію технічних засобів ЕОМ і не вимагає ні спеціалізованої системної підтримки, ні додаткового навчання обслуговуючого персоналу обчислювальної установки.

19 Висока якість обслуговування користувачів. Дружня користувачеві форма завдання вхідних даних і керуючої інформації; наявність бібліотеки прототипів, засобів генерації і дискретизації геометричних поверхонь; висока швидкість розрахунків; обмеження на розмірність задачі тільки ресурсами і швидкодією ЕОМ; достовірність отриманих результатів і подання їх в закінчений формі, яка не вимагає додаткової її обробки; графічне і чисельне документування вихідний інформації у відповідності до встановлених вимог.

### 3.1.5 *Можливості ПЗ*

За допомогою ПЗ «ДИПРОС» можна досліджувати складні тривимірні пластинчато-оболонкові одношарові і багатошарові конструкції – тонкі, середньої товщини і товсті, прості і комбіновані, відкриті і замкнуті, гладкі і із зламами. Їх форма може здаватися аналітично і чисельно, бути ідеальною або з недосконалостями, мати постійні і змінні геометричні і фізико-механічні параметри. Конструкція може бути послаблена отворами і вирізами, підкріплюватися переривчастими або суцільними ребрами з центральним і ексцентричним розташуванням щодо серединної поверхні оболонки, мати початкові прогини, попереднє напруження, приєднані маси, жорсткі і пружні в'язі, а також деякі інші особливості.

Зовнішні впливи на конструкцію, які моделюються, можна віднести до трьох груп:

А) силові – зосереджені сили, нормальній і дотичний тиск, власна вага, відцентрові сили, розподілене поверхневе і об'ємне навантаження загального характеру (магнітне, інерційне, тиск рідини, газу, твердого штампа тощо);

Б) кінематичні – вимушенні зміщення точок тіла і повороти перетинів, осідання опор, зняття існуючих і накладення додаткових в'язів;

В) температурні – нерівномірне температурне поле на всій або частині конструкції.

ПЗ «ДИПРОС» дозволяє досліджувати лінійний, а також геометрично, фізично і конструкційно нелінійні процеси деформування. З його допомогою можуть бути вирішенні наступні завдання:

А) лінійні:

- визначення НДС від статичного навантаження;
- визначення критичних навантажень, форм втрати стійкості і відповідного їм НДС;
- визначення частот, форм власних коливань і відповідного їм НДС;
- визначення НДС і динамічних характеристик конструкції від імпульсного навантаження загального вигляду;
- визначення НДС і динамічних характеристик при стаїх коливаннях від

гармонійного навантаження;

- визначення НДС і динамічних характеристик при сташих коливаннях від періодичного навантаження загального вигляду;
- визначення НДС і динамічних характеристик від стаціонарних випадкових навантажень загального вигляду; оцінка довговічності;

Б) геометрично нелінійні:

- визначення НДС від статичного навантаження;
- визначення НДС і статичного поведінки в околиці особливих точок, пошук біфуркаційних рішень і побудова рівноважних станів в закритичній області;
- визначення НДС і динамічних характеристик від імпульсного навантаження загального вигляду;
- визначення НДС і динамічної поведінки в околиці особливих точок, пошук біфуркаційних рішень і побудова рівноважних станів в закритичній області.

На вхід ПЗ надається інформація про топологію, геометрію і фізико-механічні характеристики об'єкта, закони зміни зовнішніх впливів і кінематичні обмеження, керуючі параметри.

На виході можуть бути отримані в табличній і графічній формі силові і деформаційні характеристики послідовних станів об'єкта в залежності від рівня інтенсивності зовнішніх впливів (навантаження) і/або часу.

Отримані результати включають в себе: дані про топологію і кінематичні обмеження; функції координат, навантажень, прогинів, напружень і деформацій; значення зусиль в перетинах і опорні реакції; власні частоти, форми коливань і притаманний їм НДС; критичні навантаження, форми втрати стійкості і притаманний їм НДС; графіки зміни силових і деформаційних факторів в залежності від рівня інтенсивності зовнішніх впливів (навантаження) і/або часу.

## **3.2 Умови застосування ПЗ**

### ***3.2.1 Вимоги до технічних засобів***

Для функціонування ПЗ необхідна ЕОМ з технічними характеристиками не нижчими за наступні:

- 1) обсяг оперативної пам'яті – не менше 1 Мбайт;
- 2) обсяг доступної зовнішньої пам'яті на магнітному носії (жорсткому диску ЕОМ тощо) для організації бібліотек вихідних і об'єктних (завантажуваних) програм, робочих файлів і файлів-результатів розрахунків – не менше 500 Мбайт;
- 3) відеотермінал – для кодування і відеоконтроля вхідних даних, моніторингу (контролю) процесу розрахунку, динамічного керування процесом розрахунку, візуалізації і обробки результатів розрахунку;
- 4) пристрій (принтер) – для видачі на папері результатів розрахунку в алфавітно-цифровому і/або графічному форматах.

### ***3.2.2 Вимоги до системного програмного забезпечення***

Для експлуатації ПЗ «ДИПРОС» необхідна наявність наступного системного програмного забезпечення:

- 1) компілятор алгоритмічної мови Fortran-77 для компіляції програм вхідного рівня ;
- 2) редактор зв'язків і системні засоби підтримки алгоритмічної мови Fortran-77 для формування виконуваних модулів;
- 3) системні засоби, що забезпечують виконання виконуваних модулів.

Якщо все вхідні дані попередньо згенерованого модуля зчитуються з файлу на магнітному носії, то програмне забезпечення пунктів «1)» і «2)» може бути відсутнім.

### ***3.2.3 Вимоги до супроводу та обслуговування ПЗ***

Супровід ПЗ «ДИПРОС» передбачає стандартні операції по налаштуванню його на конкретний тип ЕОМ, копіювання бібліотек вихідних і об'єктних

(завантажуваних) програм з інсталяційного магнітного носія на робочий, відновленню їх в разі знищення або псування, зберігання модифікованих версій бібліотек, файлів продовження завдання і результатів розрахунку. Додаткові заходи з обслуговування ПЗ не є необхідними.

### **3.2.4 Режими роботи ПЗ**

ПЗ «ДИПРОС» орієнтований на функціонування в пакетному і/або діалоговому режимах.

## **3.3 Логічна структура ПЗ**

### **3.3.1 Складові компоненти ПЗ, їх призначення та можливості**

До складу ПЗ «ДИПРОС» входять такі незалежно функціонуючі компоненти:

1) компонент «САТРАП» – синтаксичний аналізатор-транслятор проблемно-орієнтованих мов (ПОМ).

Компонент призначений для створення і експлуатації ПОМ завдання вихідних даних програмних засобів та інформаційних систем з метою удосконалення та підвищенння ефективності останніх.

Результатом трансляції програми на ПОМ може бути послідовність інструкцій будь-якого алгоритмічної мови, керуючі дані і речення ПЗ, рядки-інструкції, призначені для обробки текстовими процесорами, генераторами введення-виведення даних тощо.

Розробка ПОМ зводиться до формування в спеціальному файлі за простими правилами семантичної таблиці. Перехід від однієї ПОМ до іншої полягає в перевизначенні цього файлу-таблиці.

Компонент може застосовуватися як складовий елемент різних САПР, автоматизованих систем управління (АСУ), автоматизованих систем наукових досліджень (АСНД) тощо. Зокрема, він може бути використаний в системах підготовки даних для верстатів з числовим програмним управлінням, обслуговувати системи міцнісних, економічних і бухгалтерських розрахунків, управляти роботою ПЗ для графічного відображення образів, а також поєднуватися з іншим ПЗ, припускається застосування компонента в якості незалежного ПЗ

загального користування.

2) компонент «СТАТОС» – статика оболонкових систем (в лінійній постановці).

Компонент призначений для визначення НДС пластинчато-оболонкових конструкцій від статичного навантаження.

3) компонент «ЛИНОС» – лінійна стійкість оболонкових систем.

Компонент призначений для визначення критичного навантаження, форм втрати стійкості і відповідного їм НДС пластинчато-оболонкових конструкцій.

4) компонент «КОЛОС» – коливання оболонкових систем (в лінійній постановці).

Компонент призначений для вирішення наступних завдань механіки пластинчато-оболонкових конструкцій:

- визначення частот, форм власних коливань і притаманних їм НДС;
- визначення НДС і динамічних характеристик від імпульсного навантаження загального вигляду;
- визначення НДС і динамічних характеристик при стаїх коливаннях від гармонійної навантаження;
- визначення НДС і динамічних характеристик при стаїх коливаннях від періодичної навантаження загального вигляду;
- визначення НДС і динамічних характеристик від стаціонарних випадкових навантажень загального вигляду; оцінка довговічності;

5) компонент «УСТОС» – стійкість і статика оболонкових систем (в нелінійній постановці).

Компонент призначений для вирішення наступних завдань механіки пластинчато-оболонкових конструкцій:

- визначення НДС від статичного навантаження;
- визначення НДС і статичного поведінки в околиці особливих точок, пошук біfurкаційних рішень і побудова рівноважних станів в закритичній області.

6) компонент «ДИНОС» – динаміка і стійкість оболонкових систем (в нелінійній постановці).

Компонент призначений для вирішення наступних завдань механіки

пластиначато-оболонкових конструкцій:

- визначення НДС і динамічних характеристик від імпульсного навантаження загального вигляду;
- визначення НДС і динамічної поведінки в околиці особливих точок, пошук біфуркаційних рішень і побудова рівноважних станів в закритичній області.

7) компонент «БІНОМ» – банк інформації про математичну модель і програма управління обміном між оперативної та зовнішньою пам'яттю ЕОМ.

Компонент призначений для управління операціями вводу-виводу і організації зберігання інформації на магнітних носіях прямого доступу. Він дозволяє систематизувати і ідентифікувати інформаційні масиви на запам'ятовуючих пристроях, спростити процес програмування операцій введення-виведення, універсалізувати процедури обміну між оперативною і зовнішньою пам'яттю.

Зберігання інформації здійснюється в файлі прямого доступу; її сумарний обсяг обмежується лише зарезервованими розмірами файлу, ідентифікація інформаційного масиву здійснюється по коду, який привласнює викликаюча програма. Дані про параметри і розташування інформаційних полів, які зберігаються в банку, заносяться в каталог, який розміщується на початку файлу.

Компонент може застосовуватися як складовий елемент різних ПЗ, САПР, АСУ, АСНД тощо. Припускається застосування компонента в якості незалежного ПЗ загального користування.

8) компонент «ПРОКРУСТ» – програма відображення скінченоелементних розрахунків на графічних пристроях.

Компонент призначений для подання результатів скінченоелементних розрахунків в зручній користувачеві формі. Він дозволяє прискорити і автоматизувати процес обробки чисової інформації, привести її до придатного для швидкої якісної оцінки і документування вигляду.

Підготовка завдання для процесу графічного відображення здійснюється на ПОМ. Інформація для побудови зображення може бути описана на ПОМ, або попередньо занесена в файл прямого доступу на магнітному носії.

Компонент може застосовуватися як складовий елемент різних ПЗ для розрахунків на міцність і рішення задач математичної фізики, в САПР, АСНД

тощо. Припускається застосування компонента в якості незалежного ПЗ загального користування.

9) компонент «ДОЛИС» – документування (лістингування) результатів розв'язання завдань і текстової інформації.

Компонент призначений для надання результатів розрахунків у формі, яка відповідає вимогам до проектної, конструкторської та програмної документації. Він дозволяє прискорити і автоматизувати процес оформлення чисової, текстової та графічної інформації, привести її до виду, який відповідає встановленим вимогам.

Підготовка завдання для процесу документування здійснюється на ПОМ.

Інформація для документування повинна бути попередньо занесена в файл послідовного доступу на магнітному носії.

Компонент може застосовуватися як складовий елемент різних ПЗ, САПР, АСНД тощо. Припускається застосування компонента в якості незалежного програмного засобу загального користування.

### **3.3.2    *Структура ПЗ та зв'язки між компонентами***

Повний цикл функціонування ПЗ умовно можна розділити на три послідовні процеси:

- 1) розрахунок НДС об'єкта;
- 2) графічне відображення результатів розрахунку НДС об'єкта;
- 3) документування результатів розрахунку і (або) графічних зображень НДС об'єкта;

Всі зазначені процеси організовані на базі загальної концепції і можуть бути виконані як єдиним завданням, так і послідовністю незалежних завдань.

Кожен процес складається з наступних підпроцесів:

- 1) опис на ПОМ вхідних даних, керуючих параметрів і вимог до процесу;
- 2) трансляція за допомогою компонента «САТРАП» вхідних інструкцій на ПОМ і отримання набору вихідних Fortran-програм;
- 3) компіляція Fortran-програм і отримання об'єктних програм;
- 4) обробка редактором зв'язків об'єктних програм і формування програми виконується компонента;

- 5) виконання програми компонента, читання вхідних даних з магнітних носіїв і виведення результатів у файли форматного і безформатного запису.

Структурні схеми всіх процесів, зв'язку між процесами і компонентами наведені на Рис. 3.1, Рис. 3.2 і Рис. 3.3.

Якщо все вхідні дані попередньо згенерованої програми компонента зчитуються з файлу на магнітному носії, то підпроцеси «1)»-«4)» можуть бути відсутніми.

Виконувані програми компонентів «СТАТОС», «ЛИНОС», «КОЛОС», «УСТОС», «ДИНОС» складаються з набору укрупнених функціональних блоків, які, в свою чергу, реалізують певну послідовність операцій. В процесі рахунку будь-яка операція або блок в цілому за бажанням користувача або в залежності від обраного режиму замовчування можуть бути проігноровані або, навпаки, активовані. Склад блоків і операцій наступний:

- 1) формування математичної моделі:
  - введення вхідних даних;
  - формування топології об'єкта;
  - визначення геометрії;
  - визначення фізико-механічних характеристик матеріалів конструкції;
  - визначення граничних умов;
  - визначення початкових умов руху;
  - введення вихідного стану математичної моделі з файлу безформатного запису початкових, проміжних і кінцевих станів математичної моделі (з псевдбанку даних);
- 2) контроль вхідної інформації:
  - контроль коректності, повноти і несуперечності вхідної інформації; діагностика виявлених некоректностей;
  - числове і графічне відображення вхідного стану математичної моделі;
  - виведення інформації про вхідний стану математичної моделі в файл безформатного запису початкових, проміжних і кінцевих станів математичної моделі (псевдобанк даних);

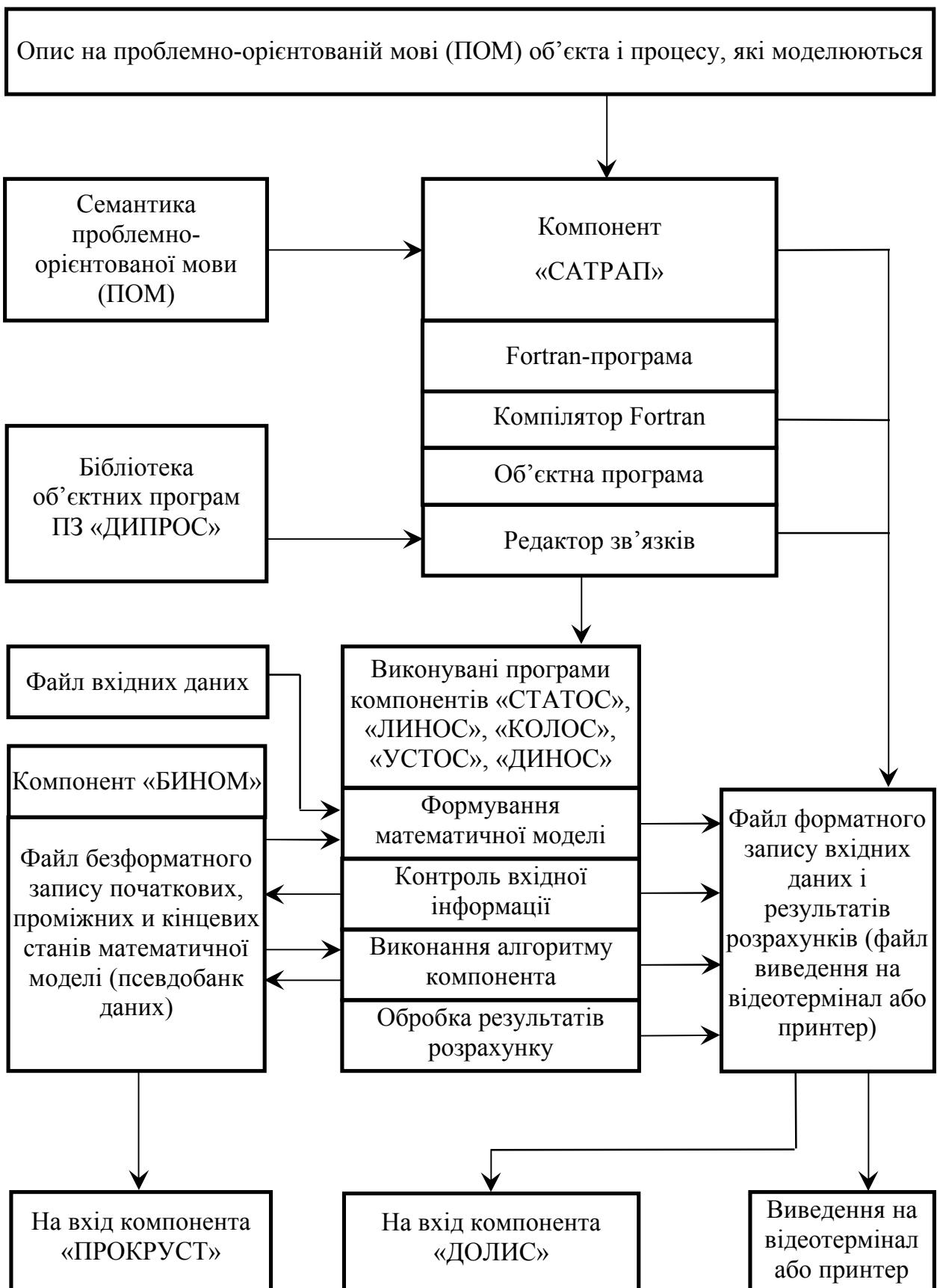


Рис. 3.1 Структурна схема процесу розрахунку напруженодеформованого стану об'єкта.

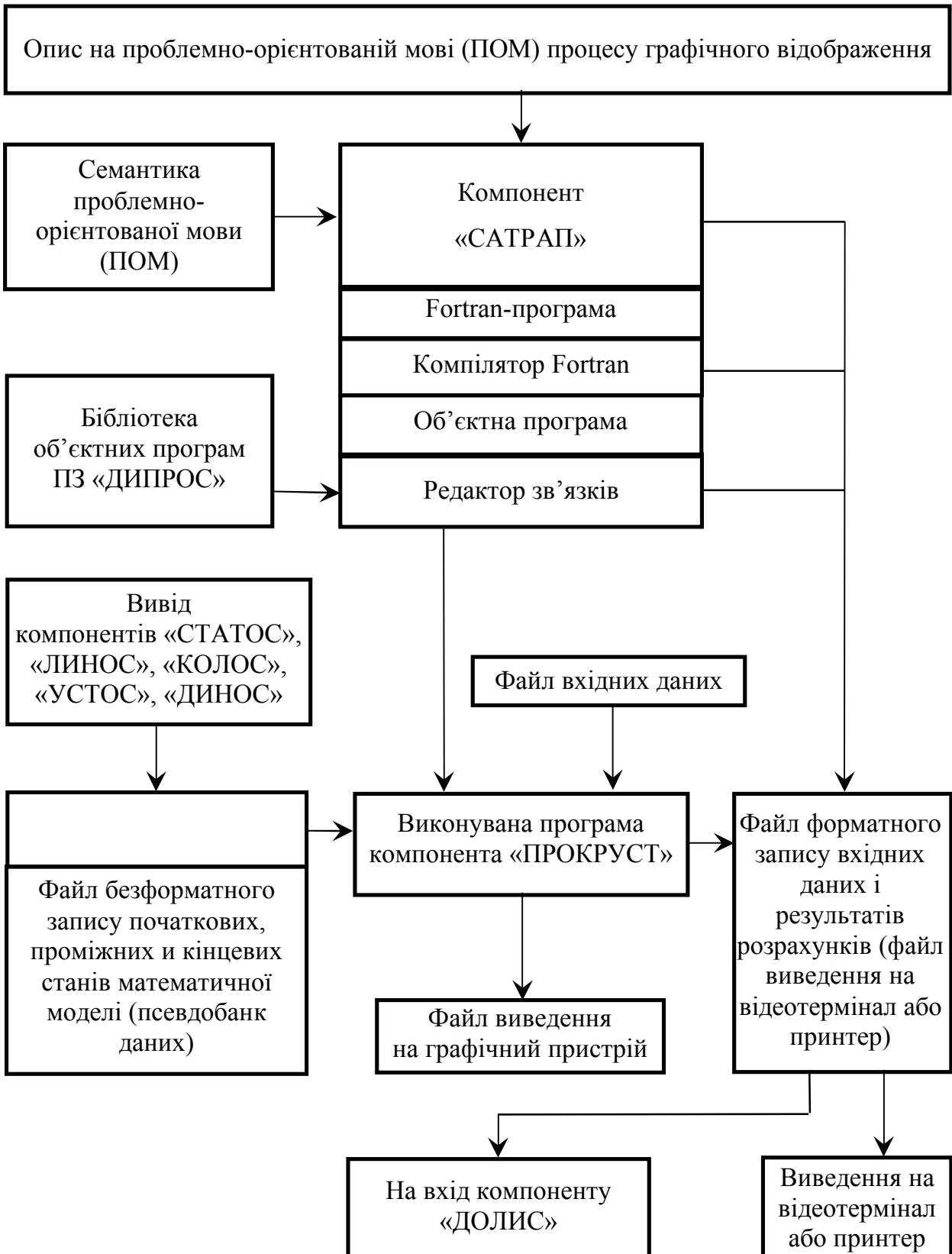


Рис. 3.2 Структурна схема процесу графічного відображення результатів розрахунку напруженого-деформованого стану об'єкта.

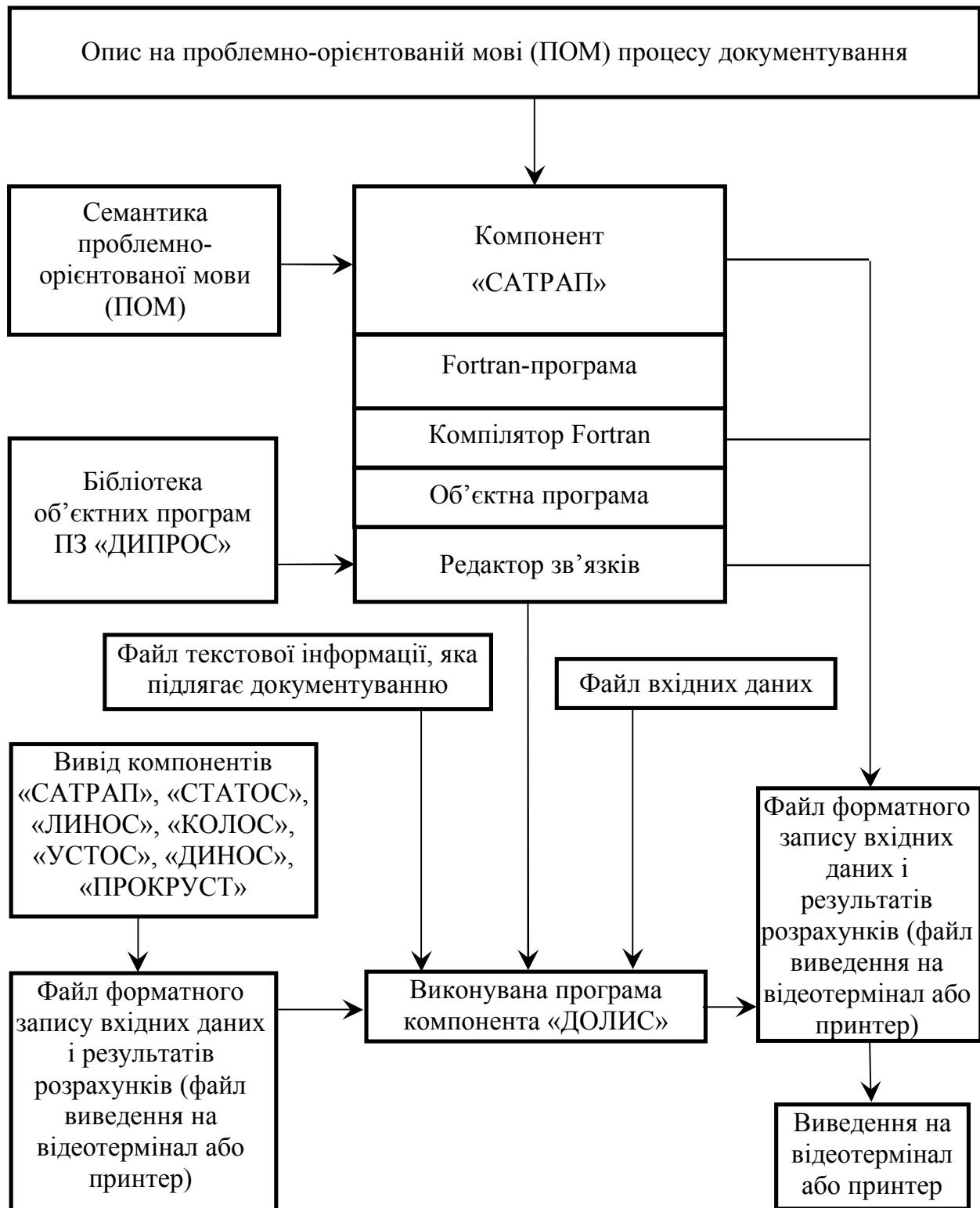


Рис. 3.3 Структурна схема процесу документування результатів розрахунку и графічного відображення напруженодеформованого стану об'єкта.

3) виконання алгоритму компонента:

- побудова рішень систем лінійних і нелінійних рівнянь процесів руху і деформування конструкції однокроковим і/або багатокроковим прямим або ітераційним методами;
  - числове і/або графічне представлення проміжних станів математичної моделі об'єкта;
  - виведення інформації про проміжні стани математичної моделі в файл безформатного запису початкових, проміжних і кінцевих станів математичної моделі (псевдоботанк даних);
  - побудова графіків зміни силових і деформаційних факторів в залежності від значень параметрів навантаження і/або часу;
- 4) обробка результатів розрахунку:
- числове і/або графічне представлення кінцевого стану математичної моделі об'єкта;
  - виведення інформації про кінцевий стан математичної моделі в файл безформатного запису початкових, проміжних і кінцевих станів математичної моделі (псевдоботанк даних);
  - специфічна обробка програмами користувача інформації про початковий, проміжні і кінцевий стани математичної моделі з метою перетворення інформації до виду, який бажаний користувачеві, але не реалізований в середовищі ПЗ.

### **3.3.3 Зв'язки ПЗ з іншими програмними засобами**

Безпосередні зв'язки ПЗ «ДИПРОС» з іншими ПЗ відсутні. Але в структурі ПЗ «ДИПРОС» закладена можливість взаємодії з іншими ПЗ, які можуть використовуватися при побудові вихідної математичної моделі, реалізації алгоритмів, представленні результатів розрахунку, а також на інших етапах розрахункового аналізу НДС конструкції.

## **3.4 Опис задач (об'єктів і процесів), які розглядаються в ПЗ**

### **3.4.1 Класи задач (об'єктів і процесів), які розглядаються**

ПЗ «ДИПРОС», внаслідок реалізованої в ньому схеми МСЕ, орієнтований на

рішення тривимірних тонкостінних конструкцій, товщина яких значно менше інших характерних розмірів (довжини і ширини для плити; радіусу і висоти для прямого кругового циліндра; радіуса кривизни і розмірів в плані для пологої оболонки і т . Д.).

Розглянемо тонкий прямокутний паралелепіпед, утворений двома обмежуючими і чотирма контурними гранями, а також має серединну площину (поверхню), рівновіддалену від обмежуючих поверхонь. Розсічмо зазначений паралелепіпед на просторові клітини двома групами площин, паралельних контурним граням, при цьому лінії перетину двох площин утворюють ребра, а трьох – відповідно вузли клітин, отриману одношарову регулярну структуру надалі будемо називати базовою топологічною моделлю.

Розіб'ємо кожну клітину своєю групою січних площин, паралельних обмежуючим граням, на відсіки і будемо їх трактувати як скінчені елементи або порожнини в багатошаровому пакеті. Такий відсік може частково або повністю розташовуватися по будь-яку сторону обмежуючих поверхонь; в найпростішому ж випадку він поєднується з кліткою, а його вузли – з вузлами топологічної моделі. Положення СЕ або порожнини в клітині визначається двома параметрами: їх товщиною і зміщенням геометричного центру СЕ від серединної поверхні клітини (екскентриситетом), віднесеними до товщини останньої.

Деформуючи базову топологічну модель в своїй площині і/або з площини, змінюючи довільним чином, але не допускаючи ступенчатості, її товщину, стягуючи сусідні вузли в точку, «згинаючи» паралелепіпед і зближуючи його протилежні контурні межі, а також поєднуючи всі ці способи можна утворити безліч відкритих і замкнутих топологічних схем, частина з яких наведена на Рис. 3.4. Причому замкнута схема виходить шляхом введення додаткового ряду клітин, укладених між зближеними гранями.

Отримане різноманіття топологічних моделей визначає той клас геометричних форм, поверхонь і відповідних їм реальних пластинчато-оболонкових конструкцій, які можуть бути досліджені за допомогою ПЗ «ДИПРОС». Приклади таких конструкцій наведені на Рис. 3.5.

При описі нерегулярностей об'єкта у вигляді отворів, вирізів, наскрізних

проточок, ребер, виточек-западин, підобластей з різномірних матеріалів і т.д., їх контури повинні максимально збігатися з межами клітин, приклади конструкцій з нерегулярностями наведені на Рис. 3.6.

### **3.4.2 Математична модель об'єкта і процесів**

В ПЗ «ДИПРОС» реалізована уточнення методика розрахунку тонкостінних конструкцій методом скінчених елементів, заснована на співвідношеннях тривимірної теорії пружності без застосування спрощуючих гіпотез технічної теорії пластин і оболонок. Це дозволило в розв'язуючих рівняннях врахувати всі компоненти тензора напружень та тензора скінчених деформацій. Орієнтація методики на розрахунок тонких і середньої товщини пластин і оболонок привела до необхідності введення гіпотези про сталість по товщині СЕ нормальних і дотичних напружень обтиснення. Інші гіпотези про НДС об'єкта в ПЗ «ДИПРОС» не застосовуються.

Все вищезазначене в однаковій мірі стосується як пластини або оболонки, так і підкріплюючих їх ребер, оскільки для опису і перших, і других застосована одна і та ж математична модель.

Реалізована методика побудована з використанням моментної схеми скінчених елементів (МССЕ) [148], яка в даний час достатньо повно обґрунтована як теоретично [149], так і при вирішенні широкого кола практичних завдань [150-152, 149, 153-154]. В якості невідомих системи розв'язуючих рівнянь обрані переміщення вузлів топологічної моделі конструкції (вузлів СЕ). При виведенні співвідношень МСЕ прийняті наступні апроксимуючі функції:

- В) Для координат і переміщень - полілінійний закон Лагранжа по об'єму клітини;
- Г) Для деформацій - лінійний закон по об'єму клітини;
- Д) Для напружень (окрім напружень обтиснення) - лінійний закон по об'єму скінченого елемента;
- Е) Для напружень обтиснення – сталість по товщині СЕ.

Таким чином, застосований скінчений елемент в загальному випадку являє собою шестигранну криволінійну призму, «межі» якої в загальному випадку є поверхнями гіпера і окреслені по контуру чотирма відрізками прямих.

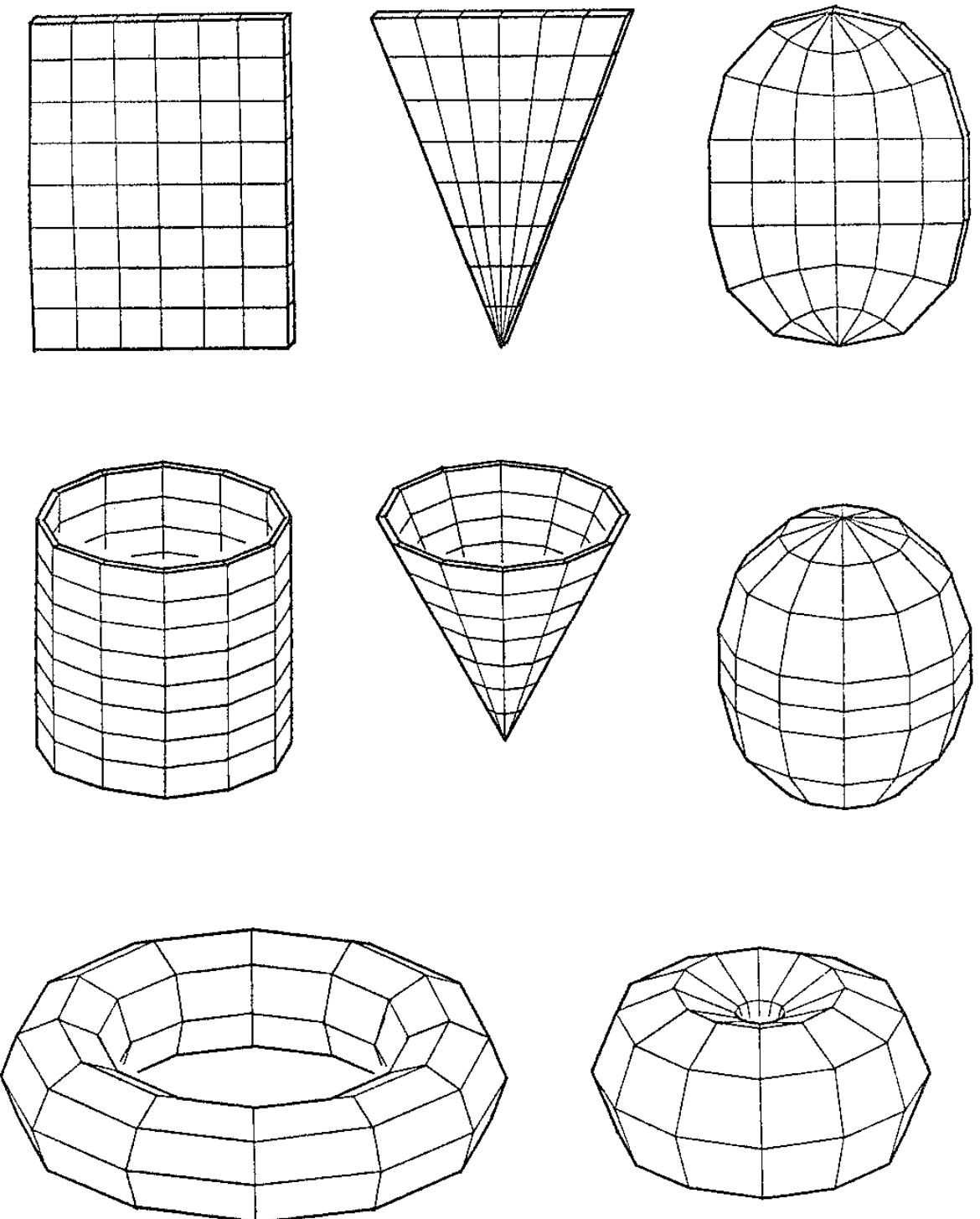


Рис. 3.4 Приклади типових топологічних моделей прийнятих для розрахунку об'єктів.

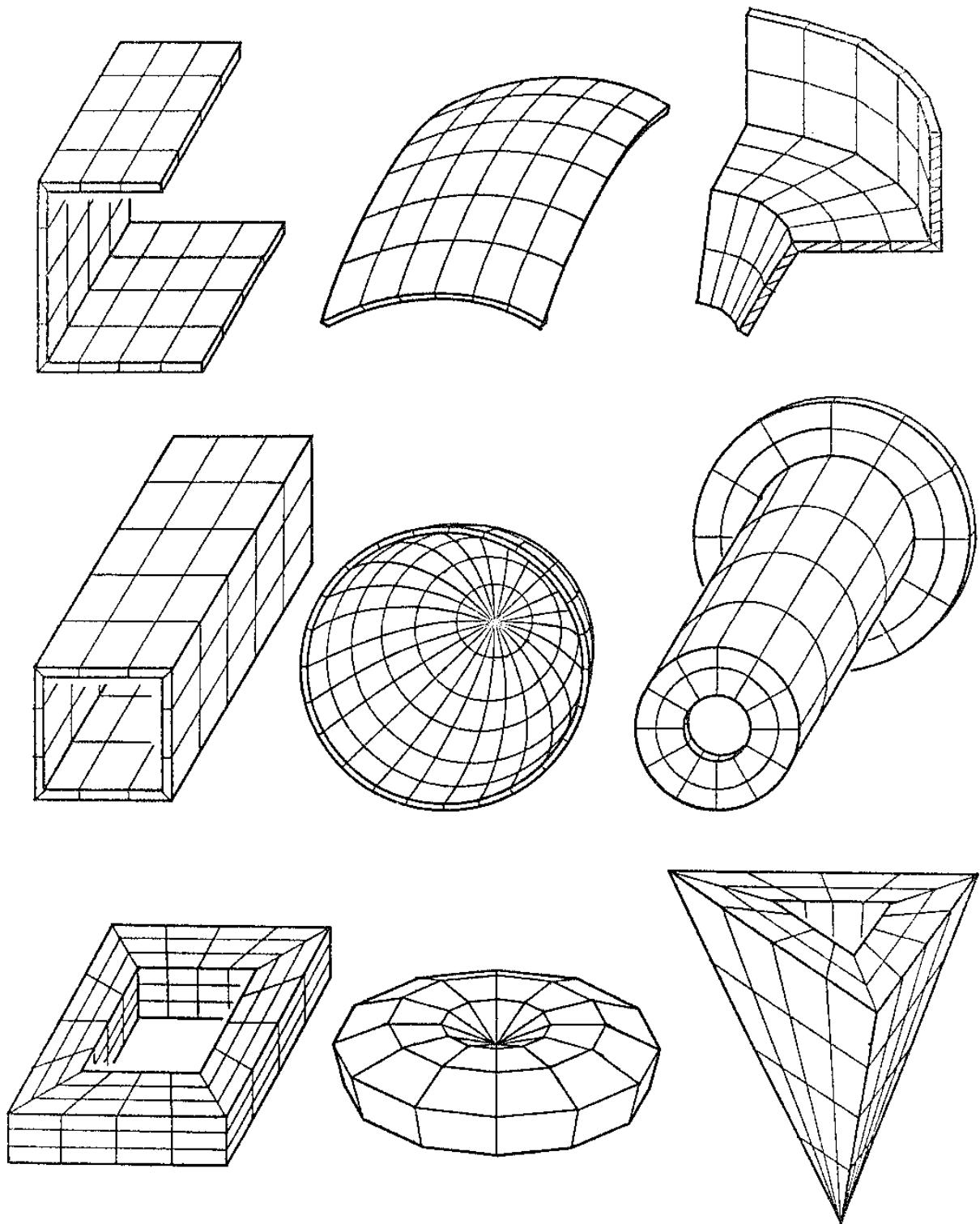


Рис. 3.5 Приклади МСЕ-моделей прийнятих для розрахунку об'єктів.

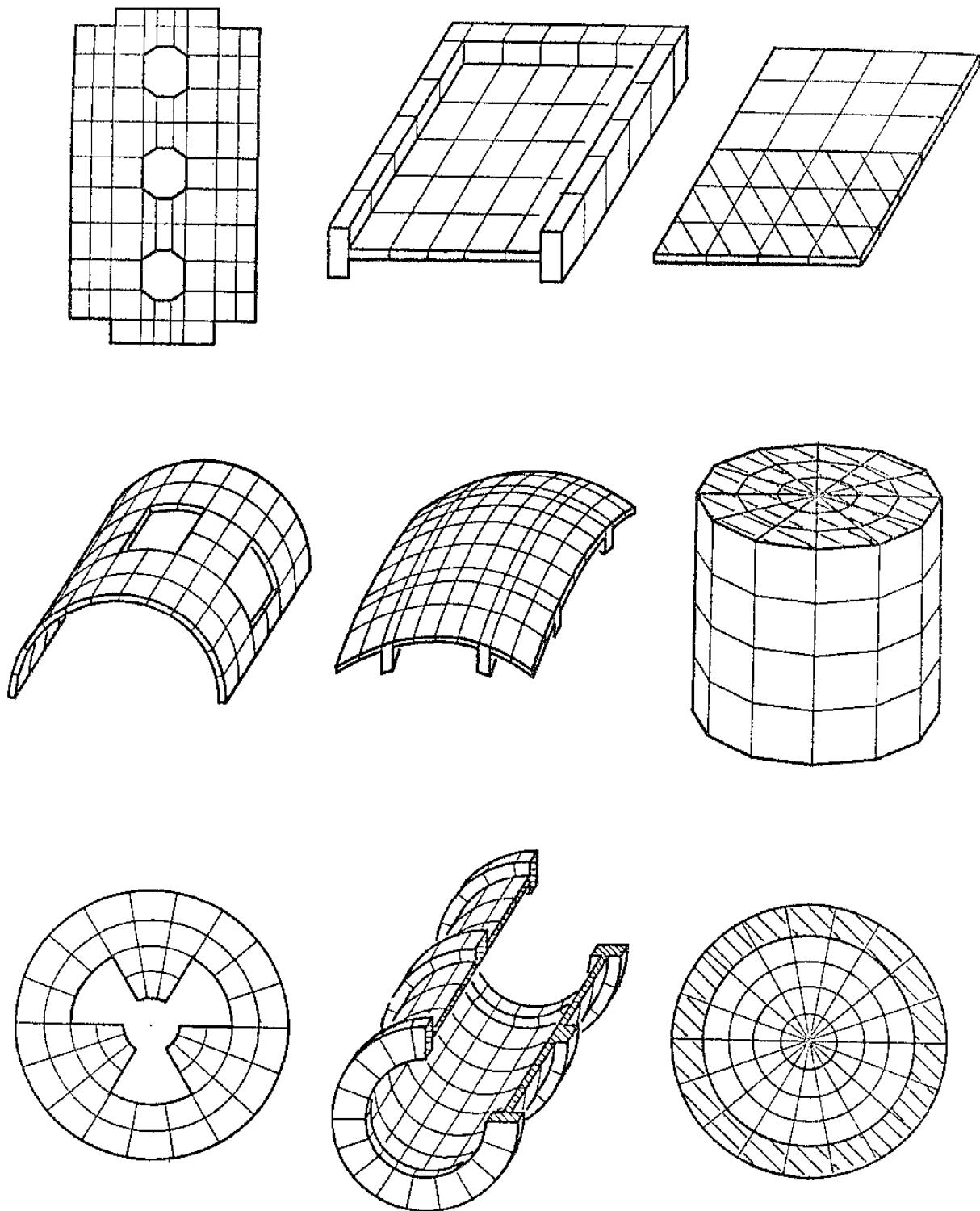


Рис. 3.6 Приклади прийнятих для розрахунку об'єктів, які мають отвори (вирізи), ребра і підобласті із різномірних матеріалів.

Зовнішні впливи задаються функціями зміни інтенсивності навантажень в просторі і часі силових, кінематичних і температурних факторів, які приводяться до енергетично еквівалентних значень вузлах топологічної моделі. Еволюційні процеси руху деформування конструкції моделюються покроковим навантаженням з визначенням рішення на кожному кроці.

### **3.4.3 Математичні методи, що застосовуються**

Серед математичних методів, які застосовуються в ПЗ «ДИПРОС», слід виділити наступні:

А) Методи моделювання фізичних процесів:

- МСЕ і моментна схема скінчених елементів;
- методи механіки деформівного твердого тіла;
- методи теорії біфуркацій і розгалуження рішень нелінійних рівнянь;
- методи опису та аналізу випадкових процесів;

Б) Обчислювальні методи:

- методи матричної алгебри;
- блочний і звичайний метод Гауса рішення системи лінійних алгебраїчних рівнянь;
- метод Ньютона-Канторовича рішення системи нелінійних алгебраїчних рівнянь;
- метод розв'язання узагальненої проблеми про власні значеннях (метод Якобі, метод спектрального розкладання матриці);
- метод редукції базису;
- методи розв'язання лінійних диференціальних рівнянь тощо.

### **3.4.4 Алгоритми, що використовуються**

В ПЗ «ДИПРОС» для розв'язання завдань використовуються, зокрема, такі алгоритми:

- алгоритми вирішення систем лінійних алгебраїчних рівнянь блоковим і звичайним методом Гауса;
- алгоритм побудови розв'язків системи нелінійних алгебраїчних рівнянь на

базі методу продовження по параметру навантаження і часу в поєднанні з методом Н'ютон-Канторовича;

- алгоритм розв'язання узагальненої проблеми про власні значеннях на базі методу редукції базису, спектрального розкладання матриці і методу Якобі;

- алгоритм побудови рішень системи лінійних рівнянь руху на базі методу розкладання загального рішення по головним координатам і методів вирішення лінійних диференціальних рівнянь;

алгоритм побудови рішень системи нелінійних рівнянь руху на базі явних і неявних різнісних схем інтегрування тощо.

### **3.4.5 Функціональні обмеження на застосування ПЗ**

Мають місце наступні функціональні обмеження на застосування ПЗ «ДИПРОС»:

1 Обмеження на топологію об'єкту. Прийняті до розрахунку топологічні моделі (див. п. 3.4.1 вище) не передбачають можливість аналізу конструкцій з формою у вигляді розгалужених або пересічних геометричних поверхонь.

2 Обмеження на розміри скінчених елементів. Хоча чисельні дослідження збігу та точності одержуваних рішень в розрахунках балок і плит засвідчили, що відношення товщини скінченого елемента до його розміру в плані може змінюватись в широких межах – від 1/50 до 1/400 [150], рекомендується для розраховуються ребристих пластин і оболонок вибирати розміри сторін таким чином, щоб це співвідношення було в межах від 1 до 1/40.

Внаслідок застосованих при виведенні співвідношень МСЕ апроксимуючих функцій (див. п. 3.4.2 вище) для забезпечення достовірності результатів розрахунків необхідно забезпечити, щоб модельована скінченим елементом ділянка оболонки була пологою, тобто відношення стріли підйому його обмежуючої поверхні до лінійних розмірів в плані було не більшим ніж 1/5.

## **3.5 Вхідні дані ПЗ**

### **3.5.1 Характер, організація і попередня підготовка вхідних даних**

За своїм характером вхідні дані компонентів можна розділити на наступні

кілька типів:

3 Вхідна інструкція компонента «САТРАП». Вхідна інструкція в загальному випадку містить: інформацію на ПОМ; сегменти вхідного рядка на фортрані; підпрограми користувача, що розташовуються в кінці вхідної інструкції. Організація даних – файл послідовного доступу, утворений логічними записами фіксованої довжини по 80 байт. Попередня підготовка полягає в формуванні файлу відповідно до синтаксису і семантики ПОМ, а також стандарту алгоритмічної мови ФОРТРАН.

4 Семантика проблемно-орієнтованої мови. Організація даних – файл послідовного доступу, утворений логічними записами фіксованої довжини по 80 байт. Попередня підготовка виконується розробниками ПЗ «ДИПРОС». Можлива модифікація семантики користувачем.

5 Бібліотека об'єктних (завантажуваних) програм ПЗ «ДИПРОС». Організація даних визначається внутрішньою структурою відповідної бібліотеки. Попередня підготовка виконується розробником комплексу. Можлива модифікація бібліотеки користувачем.

6 Підпрограми користувача, розміщені в бібліотеках вихідних і об'єктних (завантажуваних) програм. Організація даних визначається внутрішньою структурою відповідної бібліотеки. Попередня підготовка полягає в розробці, налагодженні і занесенні підпрограм в бібліотеку.

7 Файл вхідних даних (вхідна інформація користувача, зчитується виконуваною програмою компонента з файлу на магнітному носії). Організація даних визначається користувачем. Попередня підготовка полягає в заповненні файла інформацією згідно алгоритму, розробленому користувачем .

8 Файл безформатного запису початкових, проміжних і кінцевих станів математичної моделі (псевдобанк даних). Організація даних – файл прямого доступу, утворений логічними записами фіксованої довжини. Розмір запису може бути визначений користувачем або прийнятий за замовчуванням. Попередня підготовка даних здійснюється в процесі попередніх розрахунків. Обмін з файлом здійснюється компонентом «БІНОМ» за алгоритмом, визначеним користувачем або прийнятим за замовчуванням.

9 Файл форматної запису вихідних даних і результатів рахунки (файл виведення на відеотермінал або принтер). Організація даних – файл послідовного доступу, утворений логічними записами фіксованої довжини по 128 байт. Попередня підготовка даних здійснюється операторами форматного виведення числової та/або текстової інформації, що підлягає відображення на відеотерміналі, принтері або документуванню компонентом «ДОЛИС».

10 Файл текстової інформації, який підлягає документуванню. Організація даних – файл послідовного доступу, утворений логічними записами фіксованої довжини по 80 байт. Попередня підготовка полягає в заповненні файлу інформацією користувача.

### ***3.5.2   Формат, опис і правила кодування вхідних даних***

1 Для опису вхідної інструкції на ПОМ введені такі терміни: виконувана програма, головна програма, внутрішня програма, замикаюча програма, інструкція, параметри. Технічне значення термінів стане зрозумілим з подального тексту.

Виконуваною програмою на ПОМ є послідовність програм: головної, довільного набору внутрішніх і, за необхідністю, замикаючої. Програми складаються з рядків-інструкцій, які мають ідентифікатор і список параметрів. Інструкція-рядок без параметрів є ознакою початку однайменної програми. Замикаюча програма складається з єдиного рядка-інструкції – ідентифікатора і наступних за ним підпрограм користувача.

Для зручності роботи з ПЗ інформація про завдання структурована і розбита на категорії, зокрема, такі: «Топологія», «Геометрія», «Матеріали», «Вузлове навантаження», «Елементне навантаження», «Алгоритми», «Файли», «Виведення на друк», «Виведення на графіку», «Програми користувача» тощо.

Якщо вхідна інструкція описує всю задачу в цілому, то окремо взята програма задає інформацію певної категорії, а рядок-інструкція – будь-якої інформаційний блок категорії. Ідентифікатори за своїм змістом відображають функціональне призначення програм та інструкцій і можуть записуватись в повній або скороченій формі.

Логічні записи вхідного рядка, які можуть бути декількох типів,

класифікуються за змістом свого першого байту (символу): пробіл - інструкція ПОМ, розташована з 6-го по 72-й байти; символ «С» – рядок-коментар; символи «D» і «V» – відповідно, декларативні і виконувані оператори фортран; інші символи в першій позиції трактуються як помилка в даних.

Фрагмент вхідного рядка для процесу розрахунку НДС пластинчато-оболонкової конструкції може мати, наприклад, наступний вигляд:

```

дипрос;
c
c      главная программа входной строки
c
c      компонент: статос;
c *****
c      геометрия
c
c      программа задания геометрии
c
d      logical obx
d      common/obx/obx
c
c      dlina=100.d0
v      dlina=110.d0
v      obx= dlina.eq.100
c
c      плита: длина='2.d0*dlina', ширина=90d0, толщина=1.d0;
v      call printx (x, nux)
v      call corgeo (x, nux)
v      call printx (x, nux)
c *****
c      материалы;
c
c      программа задания физико-механических констант
c      материалов конструкции

```

```

c
изотропный: e=2.1d6, v=0.3d0
c ****
c
• • • • • • • • • • • • • • • • • • • • • • • • • • • • •
c ****
c узловая нагрузка;
c
c программа задания узловых сил и моментов
c
d logical obx
d common/obx/obx
c
v if (obx) go to 35
c
c сосредоточенная сила. компоненты: q1=33.d0, q3=4.d0, n узла=25;
c
v 35 continue
c
c соредоточенный момент. компоненты: q2=35.d0, n узла=(16, 44);
c ****
c элементная нагрузка;
c
c программаа задания объемной и поверхностной
c конечноэлементных нагрузок
c
c нормальное давление: интенсивность=17.d0;
c нормальное давление: интенсивность=55.d0, n кэ=13;
c ****
c вывод на печать;
c
c программа управляющая выводом на печать и в файлы

```

```

c
исходное состояние: координаты, нагрузки;
конечное состояние: перемещения, напряжения,
главные напряжения, усилия и моменты, реакции;
c ****
c программы пользователя;
c
c замыкающая программа (подпрограммы пользователя на фортране)
c
c subroutine corgeo (x, nux)
c
c программа коррекции геометрии плиты. изменяются
c координаты плиты в узлах nuz
c x - массив координат узлов
c nux - число узлов топологической модели
c
c implicit real*8(a-h, 0-z)
c
c dimension x(3, nux)
c dimension nuz(6)
c
c data nuz/7, 12, 16, 25, 26, 30/
c
c do 1 i=1, 6
c     x(1, nuz(i))=x(1, nuz(i))+0.2d0
1 continue
c
c return
c end
c ****
c subroutine printx (x, nux)
c
c программа печати координат узлов топологической модели

```

```

c
implicit real*8(a-h, 0-z)
c
dimension x(3, nux)
c
print 1,x
1 format (///' координаты узлов топологической модели'
1 // (3d20.10, 8x, 3d20.10))
c
return
end

```

Для процесів графічного відображення і документування структура вхідного рядка аналогічна і відрізняється лише специфічною термінологією.

Компонент «САТРАП» побудований таким чином, що кожна програма на ПОМ після обробки перетворюється в окрему ФОРТРАН-програму. Формат вхідного рядка і синтаксис ПОМ зафіксовані при розробці транслятора. Семантика читається з файлу на магнітному носії і може доповнюватися новими поняттійними елементами, інструкціями та програмами. У разі некоректного оформлення вхідної інструкції, наявності семантично невизначених ідентифікаторів, невірного запису параметрів тощо транслятор видає повідомлення про помилку.

Більш докладні відомості про формат, а також опис і правила кодування вхідних даних на ПОМ викладені в основний програмної документації ПЗ «ДИПРОС» і компонента «САТРАП».

Формат і правила кодування сегментів вхідної інструкції на ФОРТРАНІ і підпрограм користувача, розташованих в кінці вхідного рядка, визначаються стандартом алгоритмічної мови. Розробка опису названих сегментів і підпрограм здійснюється користувачем.

2 Формат, опис та правила кодування семантики ПОМ викладені в основний програмної документації ПЗ «ДИПРОС» і компонента «САТРАП».

3 Формат і правила кодування бібліотеки об'єктних (завантажуваних) програм ПЗ «ДИПРОС» визначається процедурою її формування. Опис бібліотеки викладено в основний програмної документації ПЗ «ДИПРОС» і компонента

«САТРАП».

4 Формат, опис та правила кодування підпрограм користувача, які розміщаються в бібліотеках вхідних і об'єктних (завантажуваних) програм визначається, відповідно, стандартом алгоритмичної мови, документацією розробника підпрограм і процедурами формування зазначених бібліотек.

5 Розробка формату, опису та правил кодування файлу вхідних даних (вхідної інформації користувача, що зчитується виконуваною програмою компонента з файлу на магнітному носії), здійснюється користувачем.

6 Формат, опис та правила кодування файлу безформатного запису початкових, проміжних і кінцевих станів математичної моделі (псевдбанку даних) викладені в основний програмної документації ПЗ «ДИПРОС» і компонента «БІНОМ».

7 Формат, опис та правила кодування файлу форматного запису вихідних даних і результатів розрахунків (файлу виводу на відеотермінал або принтер), що підлягає документуванню, викладені в основний програмної документації ПЗ «ДИПРОС» і компонента «ДОЛИС».

8 Формат, опис та правила кодування файлу текстової інформації, що підлягає документуванню, викладені в основний програмної документації ПЗ «ДИПРОС» і компонента «ДОЛИС».

### **3.6 Вихідні дані ПЗ**

#### **3.6.1 Характер і організація вихідних даних**

За своїм характером вихідні дані компонентів можна розділити на наступні кілька типів:

1 Вихідний файл компонента «САТРАП» у вигляді набору ФОРТРАН-програм. Організація даних – файл послідовного доступу, утворений логічними записами фіксованої довжини по 80 байт.

2 Файл безформатного запису початкових, проміжних і кінцевих станів математичної моделі (псевдбанк даних). Організація даних – файл прямого доступу, утворений логічними записами фіксованої довжини. Розмір довжини запису може бути встановлений користувачем або прийнятий за замовчуванням.

3 Файл форматної запису вихідних даних і результатів розрахунків (файл виведення на відеотермінал або принтер). Організація даних – файл послідовного доступу, утворений логічними записами фіксованої довжини по 128 байт.

4 Файл виведення на графічний пристрій. Організація даних – набір керуючих команд графічного пристрою, що виводяться на проміжний носій інформації або безпосередньо на графічний пристрій.

### ***3.6.2   Формат, опис і правила кодування вихідних даних***

1 Формат і правила кодування вихідного файлу компілятора алгоритмічної мови Фортран визначаються стандартом алгоритмічної мови.

2 Формат, опис та правила кодування файлу безформатного запису початкових, проміжних і кінцевих станів математичної моделі (псевдоданку даних) викладені в основний програмної документації ПЗ «ДИПРОС» і компонента «БІНОМ».

3 Файл форматної запису вихідних даних і результатів розрахунків (файл виведу на відеотермінал або принтер) для процесу розрахунку НДС об'єкта може включати в себе повністю або частково наступну інформацію:

В) лістинг операторів мови управління завданнями і повідомень операційної системи;

Г) лістинг трансляції вхідного рядка і повідомень компонента «САТРАП»;

Д) лістинг збирання виконуваної програми компонента і повідомень редактора зв'язків;

Е) лістинг виконуваної програми компонента, який містить в текстовій формі протокол розрахунку і інформацію про початковий, проміжний і кінцевий стан математичної моделі, зокрема:

- найменування організації-розробника програмного засобу, самого ПЗ і виконуваного компонента, дати і часу початку розрахунку, типу використовуваної ЕОМ, її швидкодії, розміру займаної завданням оперативної і зовнішньої пам'яті;
- найменування і позначення досліджуваного об'єкта;
- інформація про топологію математичної моделі;
- інформація про граничні умови;

- інформація про геометрію об'єкта;
- інформацію про фізико-механічні характеристики матеріалів, що складають об'єкт;
- інформація про силові впливи на об'єкт;
- інформація про температурні впливи на об'єкт;
- інформація про переміщення точок об'єкта;
- інформація про деформації конструкції;
- інформація про напруження в конструкції;
- інформація про головні напруження в конструкції;
- інформація про зусилля і моменти в перетинах конструкції;
- інформація про величину опорних реакцій;
- інформація про власні частоти, форми коливань конструкції і відповідний їм НДС;
- інформація про критичні навантаження, форми втрати стійкості конструкції та відповідний їм НДС;
- графік зміни силових і деформаційних факторів в залежності від рівня навантаження та часу;
- дата і час закінчення розрахунку, астрономічний і процесорний час тривалості розрахунку.

4 Файл форматного запису вихідних даних і результатів розрахунку (файл виведення на відеотермінал або принтер) для процесу графічного відображення результатів розрахунку НДС об'єкта може включати в себе повністю або частково наступну інформацію:

- А-Г) аналогічно процесу розрахунку НДС об'єкта (див. п. 3 вище);
- Ж) лістинг виконуваної програми компонента «ПРОКРУСТ», що містить в псевдографічній формі інформацію про початковий, проміжні і кінцевий стани математичної моделі, зокрема:
  - найменування організації-розробника програмного засобу, самого ПЗ і виконуваного компонента, дати і часу початку розрахунку, типу використовуваної ЕОМ, її швидкодії, розміру займаної завданням оперативної і зовнішньої пам'яті;
  - зображення геометрії об'єкта;

- зображення силових впливів на об'єкт ізолініями, муаровими смугами або у вигляді епюр;
- зображення температурних впливів на об'єкт (аналогічно);
- зображення переміщень об'єкта (аналогічно);
- зображення деформацій конструкції (аналогічно);
- зображення напружень в конструкції (аналогічно);
- зображення головних напружень в конструкції (аналогічно);
- зображення зусиль і моментів в перетинах конструкції (аналогічно);
- зображення опорних реакцій (аналогічно);
- зображення форм коливань конструкції і відповідного їм НДС (аналогічно);
- зображення форм втрати стійкості конструкції та відповідного їм НДС (аналогічно);
- дата і час закінчення завдання, астрономічний і процесорний час розрахунку.

5 Файл форматної запису вихідних даних і результатів розрахунку (файл виведення на відеотермінал або принтер) для процесу документування результатів розрахунку і (або) графічного відображення НДС об'єкта може включати повністю або частково наступну інформацію:

А-Г) аналогічно процесу розрахунку НДС об'єкта (див. п. 3 вище);

Д) лістинг виконуваної програми компонента «ДОЛИС», що містить документовані за встановленою формою результати розрахунку НДС об'єкта або текстову інформацію, в тому числі, зокрема:

- найменування організації-розробника програмного засобу, самого ПЗ і виконуваного компонента, дати і часу початку розрахунку, типу використовуваної ЕОМ, її швидкодії, розміру займаної завданням оперативної і зовнішньої пам'яті;
- безпосередньо документовану інформацію;
- дата і час закінчення завдання, астрономічний і процесорний час розрахунку.

6 Формат, опис та правила кодування інформації, яка виводиться на графпристрій, регламентуються документацією по роботі з відповідними технічними засобами. Опис виведеної інформації викладено в основний програмної

документації комплексу.

### **3.7 Виконання компонентів ПЗ**

#### **3.7.1 Налаштування компонентів**

Налаштування компонентів полягає в копіюванні бібліотек вихідних і об'єктних (завантажуваних) програм з дистрибутивного магнітного носія на робочий і в корекції процедур управління компонентами відповідно до конкретної конфігурації ЕОМ, типів пристройів, ідентифікаторів магнітних носіїв, файлів тощо.

#### **3.7.2 Вхідні точки**

Всі виконувані програми компонентів мають одну (основну і єдину) вхідну точку.

#### **3.7.3 Завантаження і виконання**

Завантаження та передача на виконання програми компонента здійснюється стандартними командами операційної системи. Опис відповідних командних процедур викладено в програмній документації ПЗ.

#### **3.7.4 Повідомлення ПЗ**

Внутрішньопрограмні повідомлення про роботу компонентів ПЗ виводяться в файл форматної запису вихідних даних і результатів рахунки (файлу виводу на відетермінал або принтер).

#### **3.7.5 Перевірка ПЗ**

Перевірка працездатності компонентів ПЗ здійснюється розрахунком контрольно-тестових завдань і звірянням отриманих результатів з еталонними лістингами. Опис завдань і зазначені лістинги наведені в основний програмної документації ПЗ.

### **3.8 Досвід практичного застосування ПЗ**

Наразі накопичений великий досвід практичної роботи з ПЗ «ДИПРОС», який доводить його високу ефективність [149, 150]. На Рис. 3.7 наведені приклади

пластинчато-оболонкових конструкцій, для яких на стадіях проєктування і експлуатації здійснювалось визначення динамічних характеристик, дослідження НДС та оптимізація геометричних і фізико-механічних параметрів. Нижче наведено короткий опис зазначених конструкцій і особливостей їх розрахунку.

1 Лопатка парової турбіни. Конструкція являє собою тонкостінний закрученій стрижень-оболонку змінної товщини. Характерні розміри: довжина – 96 см, максимальна ширина – 12.2 см, товщина від 0.1 до 1.9 см. Кількість СЕ – 96, кількість невідомих – 702. Границі умови – жорстке защемлення кореневого перетину. Зовнішні впливи – відцентрове навантаження, температурне поле, тиск високоенергетичного струменя пари.

2 Балка заднього моста вантажного автомобіля. Конструкція являє собою комбінацію циліндричної, коробчастої і сферичної частин, має змінну товщину і підкріплюючі кільцеві ребра. Характерні розміри розрахункового фрагмента (від маточини до подовжньої площини симетрії автомобіля): довжина – 101.8 см, зовнішній діаметр – від 7.2 до 12.0 см, товщина від 0.725 до 1.85 см. Кількість СЕ – 520, кількість невідомих – 3240. Границі умови – площа симетрії на широкій частині мосту, два опорних підшипника на циліндричній частині конструкції. Зовнішні впливи – вертикальні зосереджені сили на верхній площині коробчастої частини (імітація тиску на ресорну подушку), крутний момент.

3 Залізобетонна панель-оболонка. Конструкція являє собою поєднання циліндричної поверхні, вертикальних діафрагм і опорних масивних елементів. Характерні розміри розрахункового фрагмента (однієї чверті панелі): довжина – 6.00 м, ширина - 1.50 м, товщина – від 0.02 до 0.08 м, радіус циліндричної поверхні – 30.20 м. Кількість невідомих – 1218. Границі умови – дві площини симетрії, шарнірно-рухоме закріплення опорних ділянок. Зовнішні впливи – власна вага, вага покрівлі і снігу.

4 Модель об'ємно-блочної конструкції житлового будинку. Конструкція являє собою сукупність поставлених один на одного і жорстко пов'язаних між собою просторових блоків (без перекриттів). Характерні розміри: висота – 390 см, ширина – 77 см, товщина стінки – 1.4 см. Кількість СЕ - 1840, кількість невідомих – 11280. Границі умови – жорстке закріплення по нижньому перетину. Зовнішні

впливи – поздовжнє стискаюче зусилля і крутний момент у верхньому перетині.

5 Кремнієва кристалічна структура. Конструкція являє собою пластину східчасто-змінної товщини з довільним розташуванням ребер і западин. Характерні розміри розрахункового фрагмента (однієї чверті кристала): довжина і ширина – 3240 мкм, товщина – від 30 до 350 мкм. Кількість СЕ – 100, кількість невідомих – 726. Границі умови – дві площини симетрії, жорстке спирання по нижній обмежуючій поверхні контурної масивної частини. Зовнішні впливи – послідовність імпульсів нормального тиску, нерівномірне температурне поле.

6 Горизонтально розташований циліндричний контейнер. Конструкція має кругові фланці на кінцях і підкріплюють кільцеві ребра. Характерні розміри розрахункового фрагмента (однієї чверті контейнера): довжина – 3.00 м, ширина – 1.60 м, товщина стінки – 0.005 м. Кількість СЕ – 296, кількість невідомих – 950. Границі умови – дві площини симетрії, нерухоме спирання кільцевих ребер на жорсткі діафрагми. Зовнішній вплив – власна вага конструкції разом з її вмістом.

7 Циліндричний резервуар для нафти і нафтопродуктів ємністю 50 тис. куб.м. Конструкція утворена з'єднаними зварюванням сталевими листами різної товщини і підкріплена двома кільцевими ребрами (пішохідними трапами). Характерні розміри розрахункового фрагмента (однієї чверті резервуара): висота – 18.0 м, діаметр – 60.7 м, товщина стінки – від 12 до 17 мм. Кількість СЕ – 180, кількість невідомих – 1648. Границі умови – дві площини симетрії, шарнірно нерухоме спирання нижньої кромки циліндричної стінки. Зовнішні впливи – власна вага стінки, вага покриття і снігу, тиск рідини і випаровувань всередині резервуара.

8 Залізобетонна чаша декоративного фонтану. Конструкція являє собою сферичну оболонку змінної товщини. Характерні розміри розрахункового фрагмента (однієї чверті чаши): радіус зовнішньої кромки чаши – 2.25 м, товщина оболонки – від 0.08 до 0.20 м. Кількість СЕ – 110, кількість невідомих – 720. Границі умови – жорстке защемлення в центральному несучому стовпі-опорі. Зовнішні впливи – власна вага оболонки і рідини, вага людини на кромці чаши.

9 Залізобетонний покріття громадської будівлі. Конструкція утворена попередньо напруженою вантовою мережею, дрібнопористою сталевою сіткою і набризкбетонною оболонкою. Характерні розміри розрахункового фрагмента

(половини оболонки): діаметр нижнього контуру – 40.0 м, діаметри (осі) верхнього еліпсоподібного контуру – 5.40 і 5.75 м, висота (відстань між центрами контурів) – 11.4 м, товщина оболонки 4.5 см. Кількість СЕ – 168, кількість невідомих – 1170. Границі умови – площа симетрії, шарнірно нерухоме з'єднання оболонки з опорними контурами. Зовнішні впливи – власна вага оболонки, вага покрівлі і снігу, тиск вітру.

### 3.9 Історія розробки і розвитку ПЗ

Перша версія ПЗ «ДИПРОС» була розроблена наприкінці 80-х років минулого сторіччя. Вона являла собою складовий елемент системи математичного забезпечення розрахунків просторових конструкцій «ПРОЧНОСТЬ-75» [150], і була орієнтована для експлуатації на ЕОМ типу БЭСМ-6. Надалі ПЗ трансформувався в самостійний програмний засіб, який був адаптований для використання на нових типах ЕОМ і операційних систем, розширений на дослідження нових класів задач.

Теоретичні основи прийнятої схеми МСЕ (MCCE), застосовуваних алгоритмів, а також вихідна (первинна) архітектура комплексу розроблені доктором технічних наук, професором А.С.Сахаровим і кандидатом технічних наук, старшим науковим співробітником В.М.Кислоокім.

Первинну програмну реалізацію на ЕОМ БЭСМ-6 компонентів «СТАТОС» і «УСТОС» здійснив к.т.н., с.н.с. М.О.Соловей, компонента «КОЛОС» – к.т.н., с.н.с. А.Д.Легостаєв.

Адаптацію зазначених компонентів на ЕОМ типів ЄС, СМ і ПЕОМ, їх подальший розвиток, розробку і реалізацію компонентів «САТРАП», «ЛИНОС», «ДИНОС», «БІНОМ», «ПРОКРУСТ», «ДОЛІС» здійснював н.с. В.Б.Крицький.

В 1990-1993 рр. роботи з подальшого розширення можливостей ПЗ «ДИПРОС» здійснювались за наступними напрямками:

- 1 Створення бібліотек СЕ, які моделюють нитки і ванти, (зокрема, скінченої жорсткості), стиснено-розтягнуті стрижні і стрижні, що згинаються, мембрани, м'які оболонки і оболонки, що згинаються, масивні тіла, композиційні матеріали.

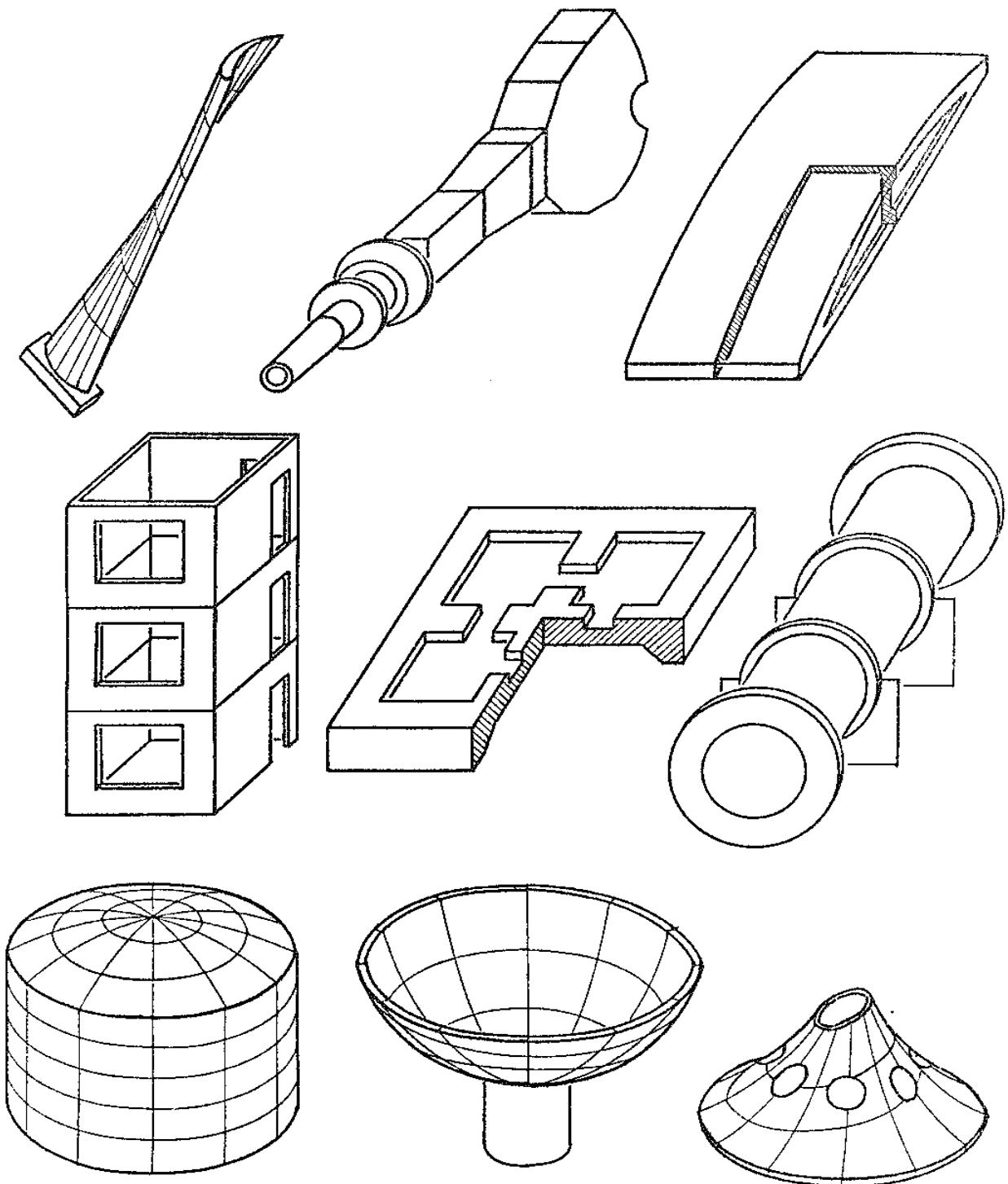


Рис. 3.7 Приклади інженерних конструкцій, для яких здійснювались оптимізація, розрахунок динамічних характеристик і аналіз НДС.

В розробці компонента «ЛИНОС» та в розвитку компонента «УСТОС» активну участь брав участь м.н.с А.Б.Крицький.

- 2 Моделювання спеціальних граничних умов.
- 3 Розробка програмних засобів для дослідження комбінованих оболонкових конструкцій, прикладами яких можуть служити наступні об'єкти (див. Рис. 3.8):
  - лопатка парової турбіни з фрагментом бандажної стрічки;
  - циліндричний несуцільний трубчастий вал-оболонка з тонкостінними прорізаними кільцевими дисками;
  - декоративна архітектурна форма-оболонка;
  - об'ємно-блокова конструкція житлового будинку з перекриттями;
  - зварні з'єднання трубчастих конструкцій;
  - пластинчастий тетраедр з прорізами;
  - опорний вузол несучої вертикальної стійки;
  - фрагмент конструкції літального апарату;
  - тимчасовий житловий або службовий блок-будинок.
- 4 Моделювання процесів стаціонарної і нестаціонарної тепlopровідності, пружноплинного деформування, термоплинності, повзучості, руйнування, контактної взаємодії тіл тощо.
- 5 Програмна реалізація методу підконструкцій і суперелементів, оптимізації конструкцій, ефективних методів вирішення систем лінійних і нелінійних алгебраїчних рівнянь рівноваги і руху.
- 6 Розробка інтерфейсів для обміну інформацією з програмами розв'язання задач механіки деформівного твердого тіла, які не використовують скінченоелементну методологію.
- 7 Адаптація ПЗ до нових типів ЕОМ і операційних систем.
- 8 Розробка засобів діалогу і інтерфейсів для взаємодії з незалежними ПЗ графічного відображення тощо.

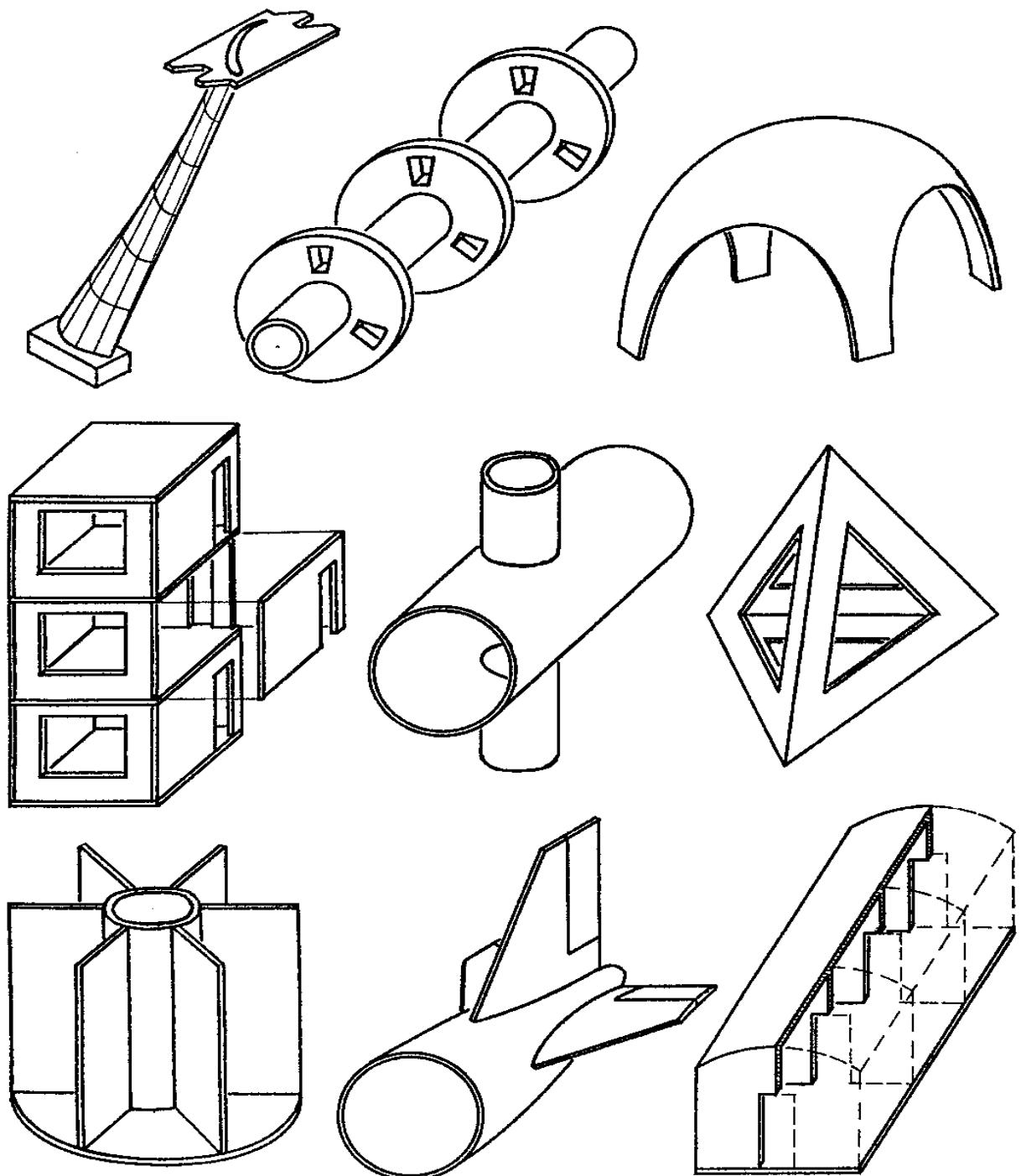


Рис. 3.8 Приклади комбінованих інженерних пластинчато-оболонкових конструкцій, для яких може здійснюватись оптимізація, розрахунок динамічних характеристик і аналіз НДС за допомогою ПЗ «ДИПРОС»

### 3.10 Висновки по розділу 3

9 Розроблена методологія моделювання НДС і динамічної поведінки тонкостінних оболонкових конструкцій, а також обчислювальні алгоритми розв'язання систем рівнянь руху досліджуваних об'єктів були програмно реалізовані у вигляді програмного засобу «ДИПРОС» («Динамика и прочность оболочечных систем»).

10 З метою забезпечення ефективності і довговічності програмного засобу архітектура ПЗ «ДИПРОС» побудована з дотриманням таких принципів як універсальність, достовірність, мобільність, незамкнутість, перешкодостійкість, висока пропускна здатність (швидкодія), оптимальність формату надання інформації, простота експлуатації, простота обслуговування, висока якість обслуговування користувачів (дружність до користувачів).

11 ПЗ «ДИПРОС» дозволяє досліджувати складні тривимірні пластинчато-оболонкові одношарові і багатошарові конструкції – тонкі, середньої товщини і товсті, прості і комбіновані, відкриті і замкнуті, гладкі і із зламами. Їх форма може здаватися аналітично і чисельно, бути ідеальною або з недосконалостями, мати постійні і змінні геометричні і фізико-механічні параметри. Конструкція може бути послаблена отворами і вирізами, підкріплюватися переривчастими або суцільними ребрами з центральним і ексцентричним розташуванням щодо серединної поверхні оболонки, мати початкові прогини, попереднє напруження, приєднані маси, жорсткі і пружні в'язі, а також деякі інші особливості.

12 Використання ПЗ «ДИПРОС» можливе в наукових дослідженнях, в проектній справі, в промисловому виробництві, при експлуатації інженерних об'єктів, в учебному процесі. Галузями використання ПЗ можуть бути, зокрема машинобудування, будівництво, суднобудування, приладобудування, авіа- і ракетобудування, автомобілебудування, енергомашинобудування тощо.

## РОЗДІЛ 4 РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕННЯ ДИНАМІЧНОЇ ПОВЕДІНКИ, НДС І ПРАЦЕЗДАТНОСТІ ЗО ЕНЕРГОБЛОКУ АЕС ПРИ КОРОТКОЧАСНИХ НАВАНТАЖЕННЯХ В УМОВАХ ПРОЕКТНОЇ І ЗАПРОЕКТНОЇ АВАРІЙ

### 4.1 Розрахункова МСЕ-модель ЗО

Як було зазначено вище (див. розділ 1.1), ЗО являє собою комбіновану тонкостінну конструкцію, утворену циліндричною (вертикальні стени завтовшки 1.2 м) і сферичною (покриття-купол завтовшки 1.1 м) оболонками, які мають узагальнено двухшарову структуру – зовнішній шар попередньо напряженого залізобетону і внутрішній шар металу – герметизуюче сталеве облицювання (ГСО) завтовшки 8 мм.

Внутрішній діаметр циліндричної частини ЗО (див. Рис. 2, Рис. 3) складає 45.00 м, внутрішній радіус сферичного купола – 35.60 м. Циліндрична частина споруди ЗО, яка розглядається, на позначці 11.80 м спирається на потужну залізобетонну плиту-перекриття завтовшки 2.5 м. Найвища точка зовнішньої поверхні купола (полюс) має позначку 75.95 м. Більш докладна інформація про конструкцію і особливості функціонування ЗО енергоблоку АЕС наведена в підрозділі 1.1 вище.

По товщині ЗО моделювалась 4-ма шарами СЕ (3 зовнішні шари бетону і 1 внутрішній шар металу, який відповідає ГСО – див. Рис. 3).

Реалізована розрахункова модель ЗО являє собою багатофрагментну квазірегулярну (регулярну в межах кожного фрагмента) 4-ришарову сіткову область. Необхідна для забезпечення прийнятної точності розрахунків густина МСЕ-сітки була визначена за результатами виконання серії обчислювальних експериментів. Вибір оптимального «ступеню» МСЕ-дискретизації здійснювався відповідно до наступних якісних критеріїв:

- можливість детальної апроксимації зон нерегулярної геометрії об'єкта (отворів, місцевих потовщень, зламів поверхні тощо);
- коректність форми застосованих об'ємних СЕ – її близькість до

прямокутного паралелепіпеду;

- реалістичність (гладкість, неекстремальність) отримуваних функцій та значень переміщень і напружень в конструкції ЗО, узгодженість вказаних значень з результатами спрощених інженерних розрахунків (для регулярних областей ЗО);
- обмеженість потрібних ресурсів обчислювальної техніки (оперативної і зовнішньої пам'яті, швидкодії, загального часу обчислень тощо).

За результатами вказаних обчислювальних експериментів для розрахункового аналізу динамічної поведінки ЗО була прийнята МСЕ-модель наступної розмірності: 21062 СЕ, 28547 вузлів, 85641 невідомих системи розв'язуючих рівнянь МСЕ (вузлових переміщень).

При побудові розрахункової МСЕ-моделі ЗО були прийняті певні спрощуючі гіпотези і припущення, які обирались і приймались таким чином, щоб забезпечити високий рівень консервативності розрахункових оцінок НДС споруди.

Зокрема, прийнято, що в межах об'єму одного скінченого елемента матеріал ЗО є ізотропним. Таблиця 4.1 містить значення характеристик шарів стінки ЗО, прийняті для розрахунку – приведені розрахункові фізико-механічні характеристики матеріалу кожного шару (які враховують фізико-механічні характеристики бетону, ненапружененої та/або попередньо напружененої арматури, наявність пустот-каналоутворювачів).

Розрахункова МСЕ-модель ЗО в цілому (зовнішній «вигляд» і переріз), а також зон нерегулярної геометрії об'єкта (отворів, місцевих потовщень, зломів поверхні тощо) наведені на Рис. 4.3 – Рис. 4.2.

Напрямки глобальних декартових координатних осей  $Z^i$  (див. Рис. 4.3) відповідають напрямкам будівельних осей ЗО і прийняті для розрахункової моделі наступними:

- центр глобальної декартової системи координат розташований на перетині горизонтальної площини с нульовою будівельною позначкою і вертикальної осі симетрії ЗО;
- вісь  $Z^1$  – лежить в площині основи ЗО і спрямована перпендикулярно площині креслення (див. Рис. 3) (з урахуванням аксонометричної проекції) на спростерегача;

- вісь  $Z^2$  – лежить в площині основи ЗО і спрямована в площині креслення (див. Рис. 3) зліва направо;
- вісь  $Z^3$  – співпадає з віссю симетрії ЗО і спрямована з центру фундаменту споруди в напрямку вершини купола.

Таблиця 4.1

**Прийняті для розрахунків характеристики шарів стінки ЗО**

№ шару	Конструктивні особливості шару	Внутрішній радіус і товщина шару, м	Приведені розрахункові фіз.-мех. характеристики матеріалу шару	
			Модуль пружності $E_{шр.пр.}$ , МПа	Коефіцієнт Пуассона $\nu_{шр.пр.}$
1	Металеве гермооблицю- вання – сталевий лист	22.500 0.008	206000	0.300
2	Залізобетон – бетон, внутрішня кільцева і меридіональна нена- пружена арматура	22.508 0.280	33976	0.2052
3	Залізобетон – бетон, каналоутворювачі, армоканати СПЗО	22.788 0.724	31187	0.2099
4	Залізобетон – бетон, зовнішня кільцева і меридіональна нена- пружена арматура	23.512 0.188	34740	0.2077

Осі місцевих («прив’язаних» до геометричних центрів конкретних СЕ, див. Рис. 2.1, Рис. 2.2) косокутних систем координат «супроводжують» геометрію ЗО; їх напрямки прийняті наступними:

- центри місцевих (скінченоелементних) косокутних систем координат співпадають з геометричними центрами СЕ (див. Рис. 2.1, Рис. 2.2);
- вісь  $X^1$  – співпадає з напрямком зовнішньої нормалі до серединної поверхні ЗО;

- вісь  $X^2$  – орієнтована в окружному напрямку ЗО супротив годинникової стрілки при спостереженні з вершини купола;
- вісь  $X^3$  – направлена вздовж меридіана ЗО від її основи до вершини купола.

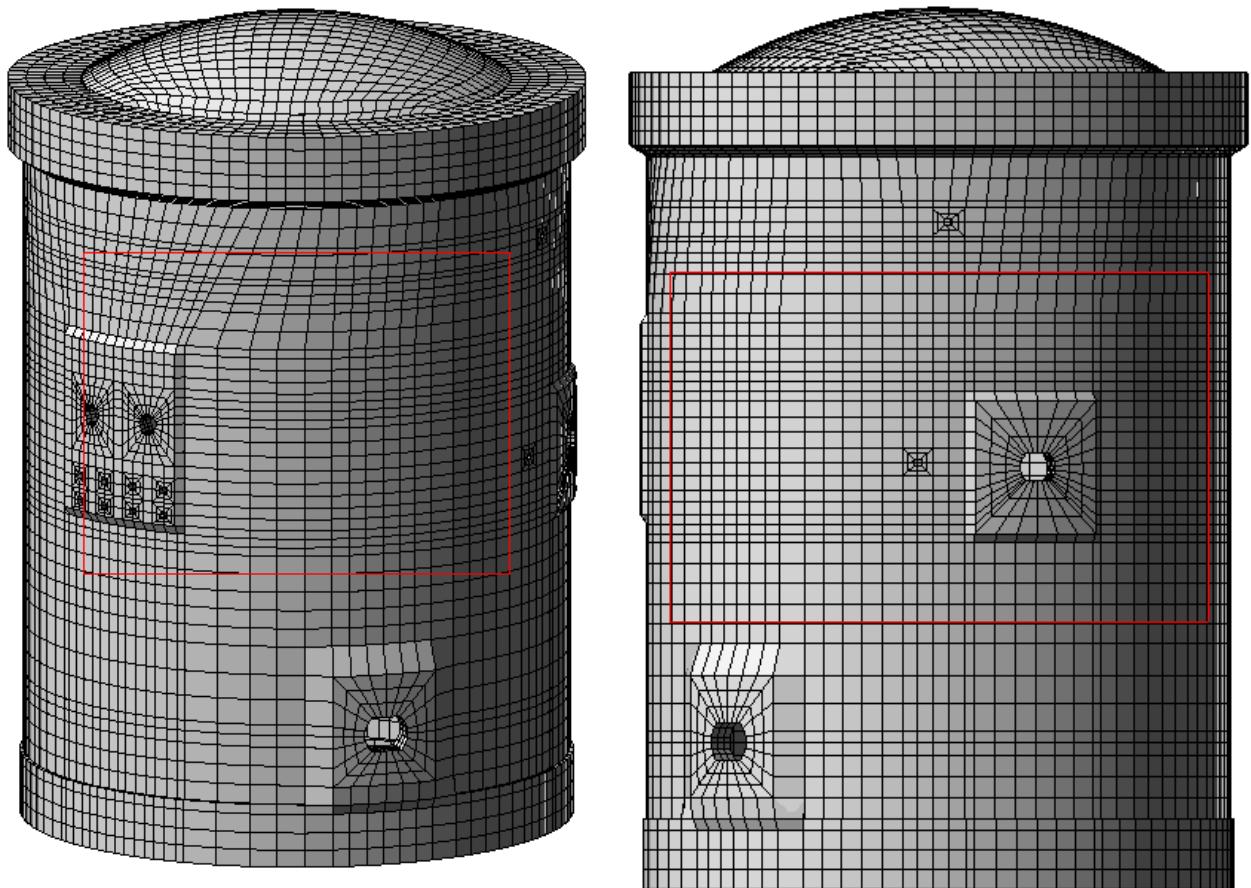


Рис. 4.1 Зовнішній вигляд розрахункової МСЕ-моделі ЗО енергоблоку АЕС (ракурси 1 і 2)

Розрахунок НДС і динамічної поведінки ЗО виконувався для умов дії на споруду наступних навантажень і впливів:

- власна вага конструкцій споруди;
- зусилля обтиснення споруди арматурними канатами системи переднапруження ЗО;
- аварійний тиск пароповітряної суміші в умовах МПА або ЗПА;
- сейсмічний вплив від проектного землетрусу інтенсивністю 6 балів (для випадку МПА) або вплив (тиск) повітряної ударої хвилі внаслідок вибуху повітряно-водневої суміші в підболовонковому просторі в умовах ЗПА.

Процедура завдання навантаження на ЗО від власної ваги конструкцій споруди прийнята стандартною для МСЕ і з зазначеної причини не деталізується.

Моделювання силового впливу на ЗО від обтиснення армоканатами СПЗО здійснювалось відповідно до методології, яка враховує реальні траєкторії каналоутворювачів системи переднапруження (див. Рис. 1.1, Рис. 1.2) і докладно викладена в підрозділі 4.2 нижче.

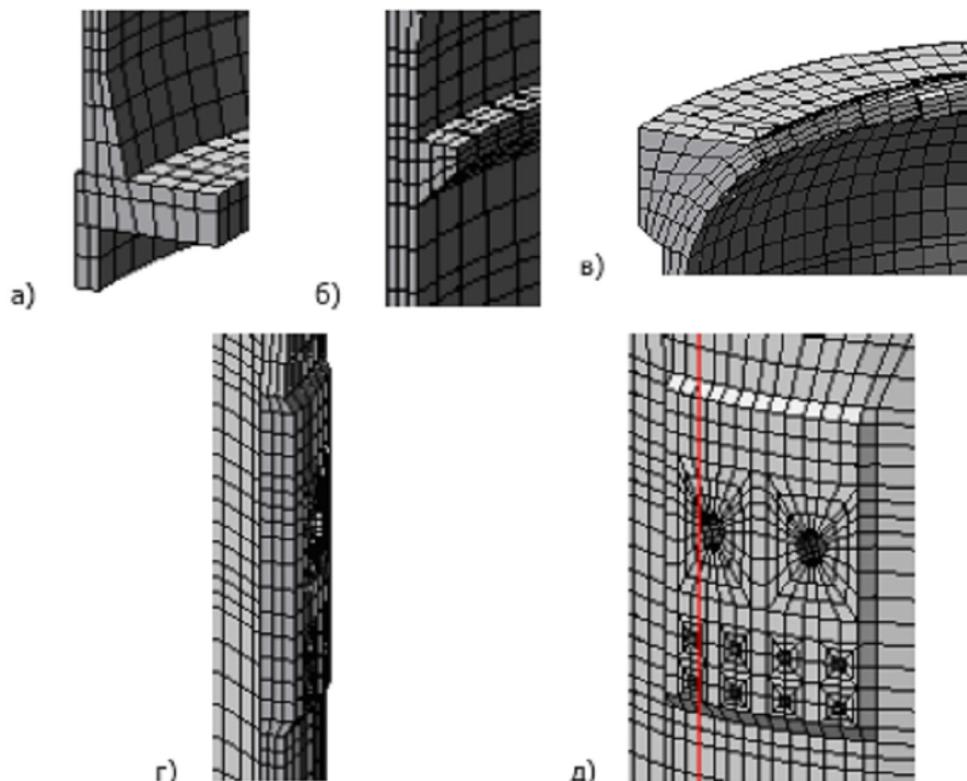


Рис. 4.2 МСЕ-модель областей нерегулярної геометрії ЗО (зон отворів, місцевих потовщень, зломів поверхні тощо)

- а) фрагмент опорної плити і приопорне потовщення ЗО;
- в) консоль рейкової колії полярного крана;
- б) анкерний карниз ЗО з прилеглим куполом;
- г-д) потовщення в зоні проходок трубопроводів живильної води і головних паропроводів.

Процедура завдання навантаження на ЗО від внутрішнього надлишкового тиску в гермооб'ємі прийнята стандартною для МСЕ і з зазначеної причини не деталізується. Графіки зміни інтенсивності тиску в гермооб'ємі в умовах

аварійного (надлишкового) тиску пароповітряної суміші (інтенсивністю 3.5 МПА) в умовах максимальної проектної аварії, а також впливу (тиску) повітряної вибухової хвилі внаслідок вибуху повітряно-водневої суміші в підболонковому просторів умовах запроектної аварії наведені в підрозділах 4.5 і 4.6 нижче.

Процедура завдання навантаження на ЗО від проектного землетрусу наведена в підрозділі 4.5 нижче.

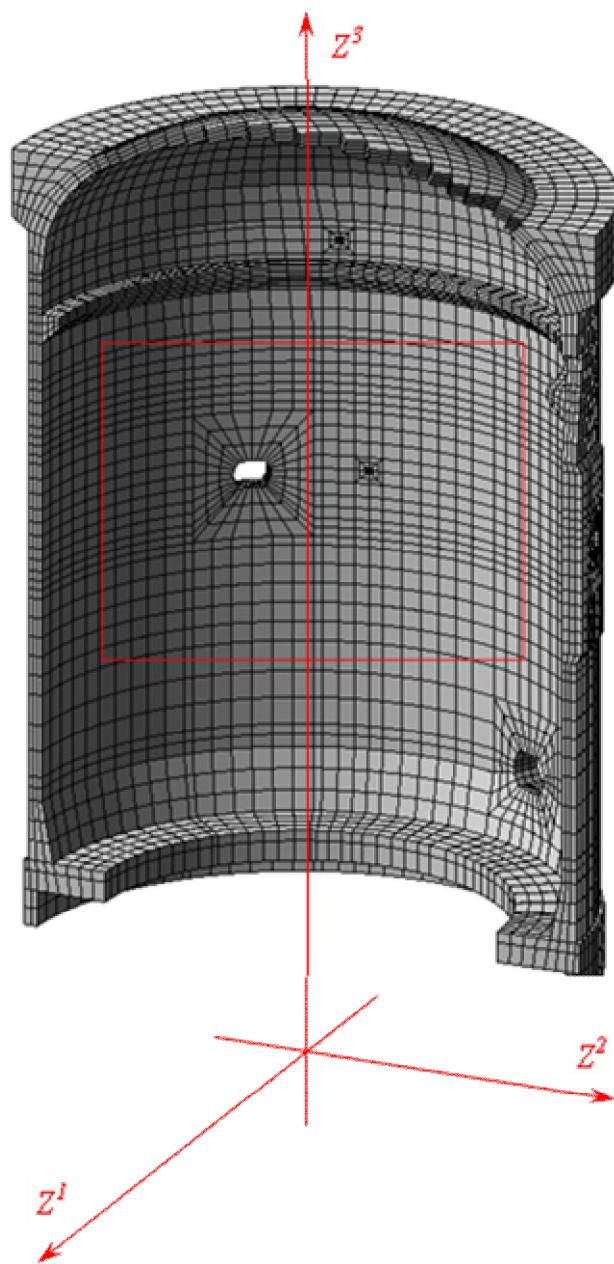


Рис. 4.3 Осьовий переріз розрахункової МСЕ-моделі ЗО енергоблоку АЕС і розташування глобальної декартової системи координат

Зважаючи на результати огляду набутого досвіду досліджень НДС і динамічної поведінки ЗО (докладніше див. розділ «Вступ» вище), а також особливостей застосованих в зазначених дослідженнях розрахункових моделей ЗО (див. Рис. 5 ... Рис. 6 вище), є підстави стверджувати, що розроблена в цій роботі розрахункова модель ЗО за ступенем врахування особливостей конструкцій споруди, коректності прийнятих конфігурацій навантажень і впливів на об'єкт не має аналогів в Україні, а, можливо, і за кордоном.

#### 4.2 Моделювання навантаження на захисну оболонку від її передобтиснення армоканатами СПЗО

Моделювання силового впливу на ЗО від обтиснення армоканатами СПЗО здійснювалось згідно методиці, яка враховує реальні траєкторії каналоутворювачів системи переднапруження (див. Рис. 1.1, Рис. 1.2).

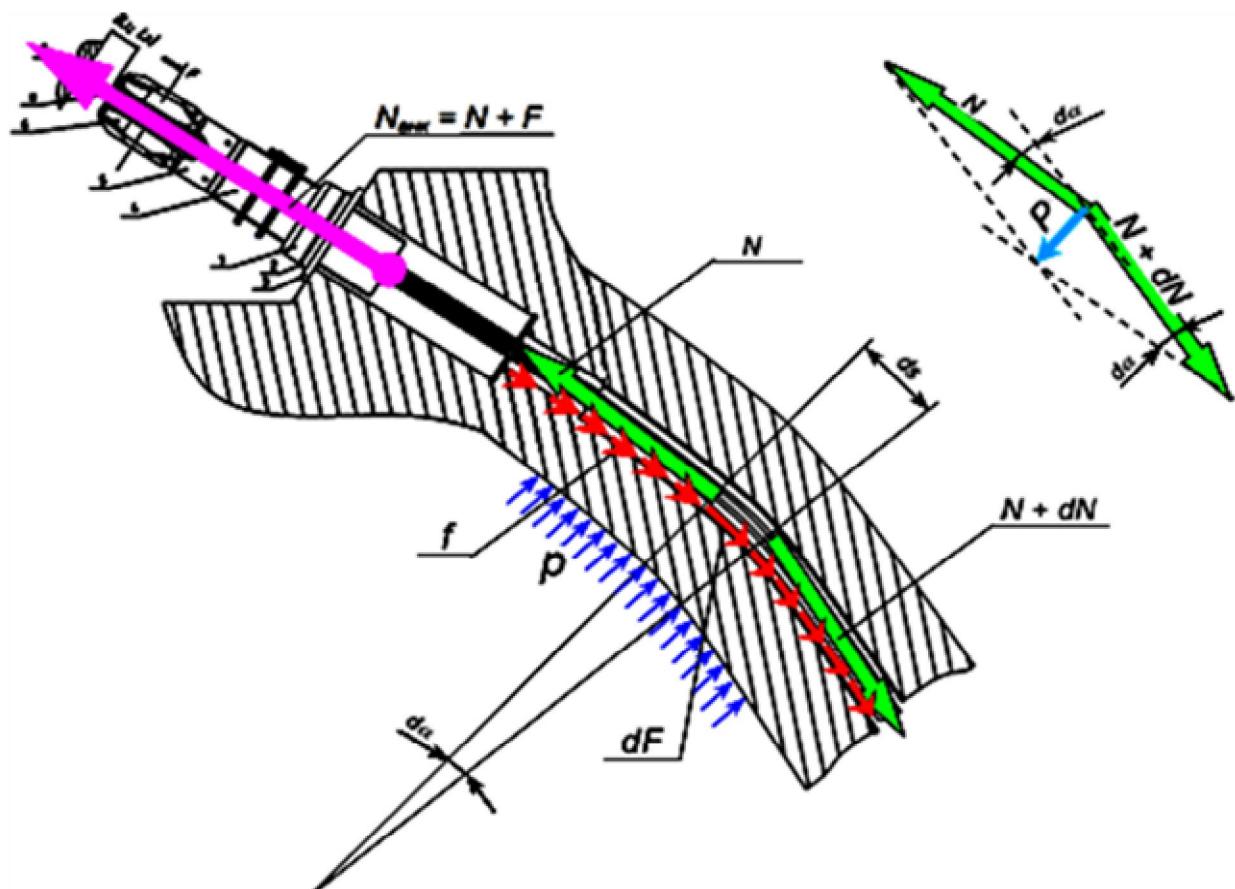


Рис. 4.4 Схема силової взаємодії між армоканатом СПЗО, каналоутворювачем і бетоном ЗО енергоблоку АЕС

Згідно схемі на Рис. 4.4 втрата  $dN$  поточного (в конкретній точці траєкторії АК) зусилля натягу АК  $N$  на ділянці траєкторії АК  $ds$  (внаслідок тертя між АК і поверхнею каналоутворювача) складає:

$$dN = -dF = -\mu P , \quad (4.1)$$

де  $dF$  – сила тертя на зазначеній ділянці траєкторії АК  $ds$  ;  
 $\mu$  – коефіцієнт тертя;  
 $P$  – загальна сила тиску АК на поверхню каналоутворювача (на ЗО) на ділянці траєкторії АК  $ds$  ;

Перетворенням співвідношення (4.1) з урахуванням схеми на Рис. 4.4 отримаємо

$$\begin{aligned} dF &= \mu P = \mu[(N) + (N + dN)] \sin \frac{d\alpha}{2} = \mu N \cdot d\alpha - \mu \cdot dN \frac{d\alpha}{2} = \mu N \cdot d\alpha = -dN , \\ \mu N \cdot d\alpha &= -dN ; \quad -\frac{dN}{N} = \mu \cdot d\alpha ; \quad \int_0^\alpha \frac{dN}{N} = -\int_0^\alpha \mu \cdot d\alpha ; \end{aligned} \quad (4.2)$$

$$\ln N(\alpha) - \ln N(0) = -\mu(\alpha - 0) ; \quad N = N_0 \cdot e^{-\mu\alpha} ; \quad F = -(N - N_0) = -N_0(e^{-\mu\alpha} - 1) ;$$

$$P = N \cdot \Delta\alpha ; \quad N = N_0 - F = N_{\text{анк}} - F .$$

Тобто, величина зусилля натягу АК  $N$  в заданій точці його траєкторії визначається з урахуванням втрат зусилля по довжині АК внаслідок тертя між АК і поверхнею каналоутворювача. Визначена вище в низці формул (4.2) функція зміни зусилля натягу АК по його довжині  $N = N_0 \cdot e^{-\mu\alpha}$  тотожно відповідає наступній залежності, наведений в СНІП 2.03.01-84 (п. 1.25, табл. 5, поз. 4) [123]:

$$N = N_0 \cdot \exp(-\delta\theta) , \quad (4.3)$$

де:  $N_0$  – величина зусилля натягу АК на тяжному анкері (приймається 722.8 тс для АК циліндра и 696.7 тс для АК купола);

$\delta = 0.089$  – узагальнений коефіцієнт тертя між АК і поверхнею каналоутворювача (визначений експериментально, див. [123]);

$\theta$  – інтегральний (накопичений) кут закручення дотичної до траєкторії АК відносно її вихідного положення на тяжному анкері АК.

Аналогічна формулі (4.3) залежність також міститься в джерелі [124, § 2].

Як наслідок, на конкретний ділянці траєкторії АК сила тертя між АК і поверхнею каналоутворювача  $F$  і сила тиску АК на СЕ  $Q$  будуть рівні:

$$F = N_0(\exp(-\delta\theta_2) - \exp(-\delta\theta_1)) = N_2 - N_1 , \quad (4.4)$$

$$Q = N_0(\exp(-\delta\theta_2) + \exp(-\delta\theta_1)) \cdot (\theta_2 - \theta_1) = (N_2 + N_1) \cdot (\theta_2 - \theta_1) , \quad (4.5)$$

де:  $N_1, N_2$  – величина зусилля натягу АК в точках «входу» в СЕ і «виходу» з СЕ;  
 $\theta_1, \theta_2$  – інтегральній (накопичений) кут закручення дотичної до траєкторії АК в точках «входу» в СЕ і «виходу» з СЕ;

Відповідно до прийнятої методики розраховується величина силового впливу АК на кожний скінчений елемент з подальшим перерахунком цього впливу до еквівалентного вектора зусиль в вузлах СЕ. Тобто, таким чином, щоб забезпечити попереднє обтиснення конструкції, еквівалентне впливу від СПЗО. Процедура обчислення вектора вузлових навантажень в СЕ від зусиль натягу АК СПЗО реалізована наступною послідовністю операцій:

- визначення АК, траєкторії яких перетинають СЕ, який розглядається;
- визначення координат точок  $T_1, T_2$  перетину траєкторій АК обмежуючих поверхонь СЕ;
- визначення компонент вектора зусилля натягу АК в точках  $T_1, T_2$  з урахуванням:
  - величини зусилля натягу АК на анкері;
  - втрат зусилля натягу по довжині АК внаслідок тертя АК о поверхню каналоутворювача;
  - визначення погонних навантажень від впливу АК на СЕ (для сили тертя між АК і поверхнею каналоутворювача  $F$  і сили тиску АК на СЕ  $Q$ ), перерахунок цих навантажень до еквівалентної системи зусиль в точках  $T_1, T_2$ ;
  - перерахунок (перетворення) зазначеної системи зусиль в точках  $T_1, T_2$  до еквівалентної системи зусиль в вузлах СЕ (зворотно пропорційно відстаням від точок  $T_1, T_2$  до вузлів СЕ, належних тій же обмежуючій поверхні СЕ).

### 4.3 Верифікація розробленої розрахункової МСЕ-моделі ЗО енергоблоку АЕС

З метою обґрунтування коректності розробленої розрахункової МСЕ-моделі ЗО енергоблоку АЕС і застосованих обчислювальних алгоритмів моделювання динамічної поведінки ЗО, адекватності МСЕ-моделі реальній споруді і

достовірності отримуваних результатів розрахунків НДС була виконана комплексна верифікація розробленої МСЕ-моделі ЗО. Результати верифікаційних досліджень, які були орієнтовані на зіставлення радіальних переміщень циліндричної частини ЗО в умовах внутрішнього надлишкового випробувального тиску в ЗО 0.42 МПа, дають підстави стверджувати наступне:

- 1) Збіг і обчислювальна стійкість застосованої модифікації МСЕ – МССЕ – обґрунтovanа в працях [139, 140, 141, 148], а також в монографії [149];
- 2) Зіставлення результатів розрахунку з аналітичними рішеннями. Порівняння результатів розрахунку 6.02 мм з відповідним аналітичним рішенням (задача Ляме [155]) – 5.80 мм – засвідчило розходження чисельного (МСЕ) і аналітичного результатів в 3.8%;
- 3) Зіставлення результатів розрахунку з натурними спостереженнями [156]. Порівняння результатів розрахунку 6.02 мм з даними геодезичних спостережень в процесі випробувань 6.50 мм засвідчило розходження результатів чисельного (МСЕ) розрахунку і натурних вимірювань в 7.4%.
- 4) Зіставлення результатів розрахунку з результатами отриманими іншими програмними засобами [157, 177, 183-184]. Порівняння результатів розрахунків, отриманих за допомогою ПЗ «ДИПРОС» 6.02 мм, з результатами отриманими альтернативними програмними засобами («CONT» [3, 157, 5], «ЛИРА» [51], «SCAD» [49], «ADINA», «ANSYS» [50]) – 5.3 ... 7.34 мм засвідчило розходження результатів в 13.6 ... 18%.

Таким чином, на підставі викладеного в пп. «1)» ... «3)» вище можна стверджувати, що результати верифікації (зіставлення результатів розрахунку ЗО отриманих за допомогою ПЗ «ДИПРОС» з аналітичними рішеннями, з даними експериментальних досліджень (випробувань) споруди і з результатами розрахунків альтернативними програмними засобами) підтвердили коректність розробленої розрахункової МСЕ-моделі ЗО, її адекватність реальній споруді і можливість отримання достовірних даних про НДС об'єкта.

#### **4.4 Результати модального аналізу МСЕ-моделі споруди ЗО**

На етапах «1)»-«3)» алгоритму аналізу динамічної поведінки ЗО (див. підрозділ 2.3.6 вище) були отримані 100 форм власних коливань ЗО (і відповідних

їм частот) нижньої частини повного спектра частот власних коливань ЗО. Значення вказаних частот містить Таблиця 4.2. З зазначеної сукупності форм коливань лише 7 форм (с номерами 1, 4, 10, 18, 25, 47, 70 и частотами 10.5, 19.7, 28.1, 38.0, 45.3, 68.7, 90.2 Гц) виявились «суттєво збуджуваними» (енергетично ємними) і такими, що мають високу модальну масу (72.6, 2.1, 1.9, 6.0, 1.7, 3.9, 1.9%) і, відповідно, суттєво впливають на динамічну поведінку об'єкта. Зображення зазначених форм коливань ЗО наведені на Рис. 4.5 ... Рис. 4.9 нижче.

## **4.5 Дослідження динамічної поведінки, НДС і працездатності ЗО в умовах спільної дії факторів максимальної проектної аварії і проектного землетрусу (режим МПА+ПЗт)**

### **4.5.1 Постановка задачі, критерії працездатності ЗО і вихідні дані**

Згідно вимогам НД З ЯРБ [122, 129-131, 158-159], проектом АЕС має бути виключена можливість виходу радіоактивних речовин (середовищ) за межі РВ (зони локалізації аварії) при будь-яких проектних аваріях, ініційованих зовнішніми або внутрішніми вихідними подіями природного та/або технологічного характеру. В цьому підрозділі наведені результати аналізу НДС, динамічної поведінки і працездатності ЗО, в умовах максимальної проектної аварії (МПА) (із екстремальним тиском пароповітряного середовища в РВ) в поєднанні із впливом проектного землетрусу згідно [130, 131]. Критерієм відмови ЗО (втрати локалізуючої функції) є (згідно [131]) порушення суцільності ГСО. Зазначена відмова при високих рівнях деформацій плинності може мати прояв у вигляді розриву основного металу листів ГСО та/або зварних швів, які з'єднують такі листи. Умовою досягнення вказаного критерію відмови прийнято досягнення/перевищення інтенсивністю напружень в матеріалі ГСО (сталь ВСт3сп5) межі плинності металу  $\sigma_t = 245.0$  МПа [158, 160]. Зазначений критерій, відомий в технічній літературі як умова плинності Губера – Мізеса – Генки [155], широко застосовується в інженерних розрахунках і має наступний вигляд:

$$\sqrt{(\sigma_x - \sigma_y)^2 + (\sigma_y - \sigma_z)^2 + (\sigma_z - \sigma_x)^2 + 6(\tau_{xy}^2 + \tau_{yz}^2 + \tau_{zx}^2)} / \sqrt{2} \geq \sigma_t , \quad (4.6)$$

де  $\sigma_t$  – межа плинності матеріалу;

$\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z, \tau_{xy}, \tau_{yz}, \tau_{zx}$  – нормальні і дотичні напруження в матеріалі.

Завдання функції зміни в часі інтенсивності розрахункового тиску на ЗО в умовах максимальної проектної аварії в РВ здійснювалось на основі наведеного на Рис. 4.10 (згідно [161]) графіка зміни (стрибку і подальшого зниження) відповідного тиску.

Таблиця 4.2

### Частоти і періоди власних коливань МСЕ-моделі ЗО

№ форми	Власні значення	Частоти		Період, с	Коеф. розподілу	Модальна маса, %	Сума модальних мас, %
		циклічна, рад/с	технічна, Гц				
1	0.015	66.154	10.529	0.095	0.715	72.584	72.584
2	0.014	70.880	11.281	0.089	0.003	0.001	72.585
3	0.014	71.294	11.347	0.088	-0.058	0.215	72.800
4	0.008	123.724	19.691	0.051	-0.543	2.100	74.900
5	0.007	137.544	21.891	0.046	0.001	0.000	74.900
6	0.007	137.628	21.904	0.046	0.007	0.000	74.900
7	0.007	144.317	22.969	0.044	-0.007	0.003	74.903
8	0.007	144.876	23.058	0.043	-0.002	0.000	74.903
9	0.006	170.540	27.142	0.037	-0.017	0.003	74.907
10	0.006	176.388	28.073	0.036	-0.467	1.912	76.819
11	0.006	176.586	28.105	0.036	-0.032	0.012	76.831
12	0.005	201.817	32.120	0.031	0.001	0.000	76.831
13	0.005	201.908	32.135	0.031	-0.015	0.006	76.837
14	0.005	213.019	33.903	0.029	0.009	0.001	76.838
15	0.005	213.700	34.011	0.029	0.019	0.005	76.843
16	0.004	226.251	36.009	0.028	-0.038	0.022	76.865
17	0.004	226.503	36.049	0.028	-0.023	0.008	76.874
18	0.004	238.810	38.008	0.026	0.642	6.001	82.875
19	0.004	252.398	40.170	0.025	0.015	0.006	82.881
20	0.004	252.831	40.239	0.025	0.006	0.001	82.882
21	0.004	268.728	42.769	0.023	-0.269	0.978	83.860
22	0.004	272.144	43.313	0.023	0.005	0.000	83.860
23	0.004	275.044	43.775	0.023	-0.018	0.004	83.864
24	0.004	284.142	45.223	0.022	0.015	0.012	83.876
25	0.004	284.846	45.335	0.022	0.366	1.717	85.593
26	0.003	286.756	45.639	0.022	0.047	0.092	85.685
27	0.003	291.521	46.397	0.022	-0.010	0.002	85.687
28	0.003	308.106	49.037	0.020	-0.005	0.001	85.687
29	0.003	308.839	49.153	0.020	0.043	0.054	85.741
30	0.003	326.573	51.976	0.019	0.004	0.000	85.741
31	0.003	326.856	52.021	0.019	-0.004	0.000	85.741

Таблиця 4.2 (продовження)

32	0.003	349.887	55.686	0.018	0.017	0.004	85.745
33	0.003	350.046	55.712	0.018	-0.001	0.000	85.745
34	0.003	352.622	56.122	0.018	0.049	0.086	85.831
35	0.003	361.619	57.553	0.017	0.001	0.000	85.832
36	0.003	364.123	57.952	0.017	0.003	0.000	85.832
37	0.003	364.454	58.005	0.017	0.002	0.000	85.832
38	0.003	394.346	62.762	0.016	-0.066	0.050	85.881
39	0.003	399.404	63.567	0.016	0.080	0.129	86.010
40	0.003	399.500	63.582	0.016	0.016	0.007	86.017
41	0.003	399.961	63.656	0.016	-0.398	0.879	86.896
42	0.002	407.953	64.928	0.015	0.044	0.028	86.925
43	0.002	415.591	66.143	0.015	-0.023	0.006	86.931
44	0.002	420.293	66.892	0.015	0.092	0.239	87.170
45	0.002	426.518	67.883	0.015	-0.019	0.026	87.196
46	0.002	428.112	68.136	0.015	0.003	0.000	87.196
47	0.002	431.408	68.661	0.015	-0.301	3.890	91.085
48	0.002	434.213	69.107	0.014	0.053	0.035	91.121
49	0.002	437.422	69.618	0.014	0.020	0.005	91.126
50	0.002	440.435	70.097	0.014	-0.008	0.000	91.126
51	0.002	443.650	70.609	0.014	0.033	0.019	91.145
52	0.002	447.827	71.274	0.014	-0.009	0.004	91.150
53	0.002	450.381	71.680	0.014	0.027	0.046	91.196
54	0.002	458.271	72.936	0.014	-0.009	0.001	91.197
55	0.002	462.517	73.612	0.014	-0.099	0.101	91.298
56	0.002	490.694	78.096	0.013	-0.003	0.000	91.298
57	0.002	491.141	78.168	0.013	-0.007	0.000	91.298
58	0.002	493.691	78.573	0.013	0.000	0.000	91.298
59	0.002	494.162	78.648	0.013	0.001	0.000	91.298
60	0.002	498.418	79.326	0.013	0.005	0.000	91.299
61	0.002	503.409	80.120	0.012	0.028	0.005	91.304
62	0.002	518.078	82.455	0.012	0.002	0.000	91.304
63	0.002	518.102	82.458	0.012	-0.001	0.000	91.304
64	0.002	538.157	85.650	0.012	0.001	0.000	91.304
65	0.002	538.705	85.737	0.012	-0.002	0.000	91.304
66	0.002	543.215	86.455	0.012	-0.009	0.004	91.308
67	0.002	544.343	86.635	0.012	0.003	0.000	91.308
68	0.002	562.456	89.518	0.011	-0.193	0.630	91.939
69	0.002	564.573	89.855	0.011	-0.027	0.011	91.950
70	0.002	566.503	90.162	0.011	0.326	1.878	93.828
71	0.002	569.992	90.717	0.011	-0.186	0.855	94.683
72	0.002	571.820	91.008	0.011	-0.022	0.013	94.696
73	0.002	572.770	91.159	0.011	-0.052	0.057	94.752
74	0.002	573.296	91.243	0.011	0.022	0.016	94.768

Таблиця 4.2 (закінчення)

75	0.002	585.422	93.173	0.011	-0.035	0.033	94.801
76	0.002	587.895	93.566	0.011	-0.006	0.001	94.802
77	0.002	590.200	93.933	0.011	-0.103	0.110	94.913
78	0.002	592.050	94.228	0.011	0.037	0.034	94.947
79	0.002	592.711	94.333	0.011	-0.026	0.018	94.965
80	0.002	593.548	94.466	0.011	0.016	0.007	94.972
81	0.002	593.728	94.495	0.011	0.037	0.030	95.002
82	0.002	595.647	94.800	0.011	-0.012	0.001	95.003
83	0.002	606.997	96.607	0.010	0.005	0.000	95.003
84	0.002	617.998	98.357	0.010	-0.015	0.007	95.010
85	0.002	618.668	98.464	0.010	0.007	0.001	95.012
86	0.002	624.310	99.362	0.010	-0.054	0.032	95.044
87	0.002	638.746	101.660	0.010	-0.003	0.000	95.044
88	0.002	640.705	101.971	0.010	0.005	0.000	95.044
89	0.002	644.009	102.497	0.010	-0.001	0.000	95.044
90	0.002	644.653	102.600	0.010	-0.007	0.001	95.045
91	0.001	667.880	106.296	0.009	0.114	0.090	95.135
92	0.001	668.896	106.458	0.009	-0.023	0.013	95.148
93	0.001	670.778	106.758	0.009	-0.012	0.004	95.152
94	0.001	674.354	107.327	0.009	-0.006	0.000	95.152
95	0.001	679.716	108.180	0.009	-0.031	0.023	95.175
96	0.001	685.552	109.109	0.009	-0.026	0.019	95.194
97	0.001	688.967	109.653	0.009	-0.099	0.170	95.364
98	0.001	692.714	110.249	0.009	0.185	0.209	95.573
99	0.001	695.671	110.719	0.009	-0.005	0.000	95.574
100	0.001	695.805	110.741	0.009	0.050	0.038	95.612
Сума модальних мас для частот № 1, 4, 10, 18, 25, 47, 70						90.082	

Для завдання сейсмічного впливу на ЗО від проектного землетрусу була використана оцифрована трикомпонентна поверхова (на висотній позначці 11.800 м) акселерограма (див. Рис. 4.11), отримана за результатами інженерних довишукувань сейсмічної небезпеки на території розміщення проммайданчику АЕС і наведена в [162].

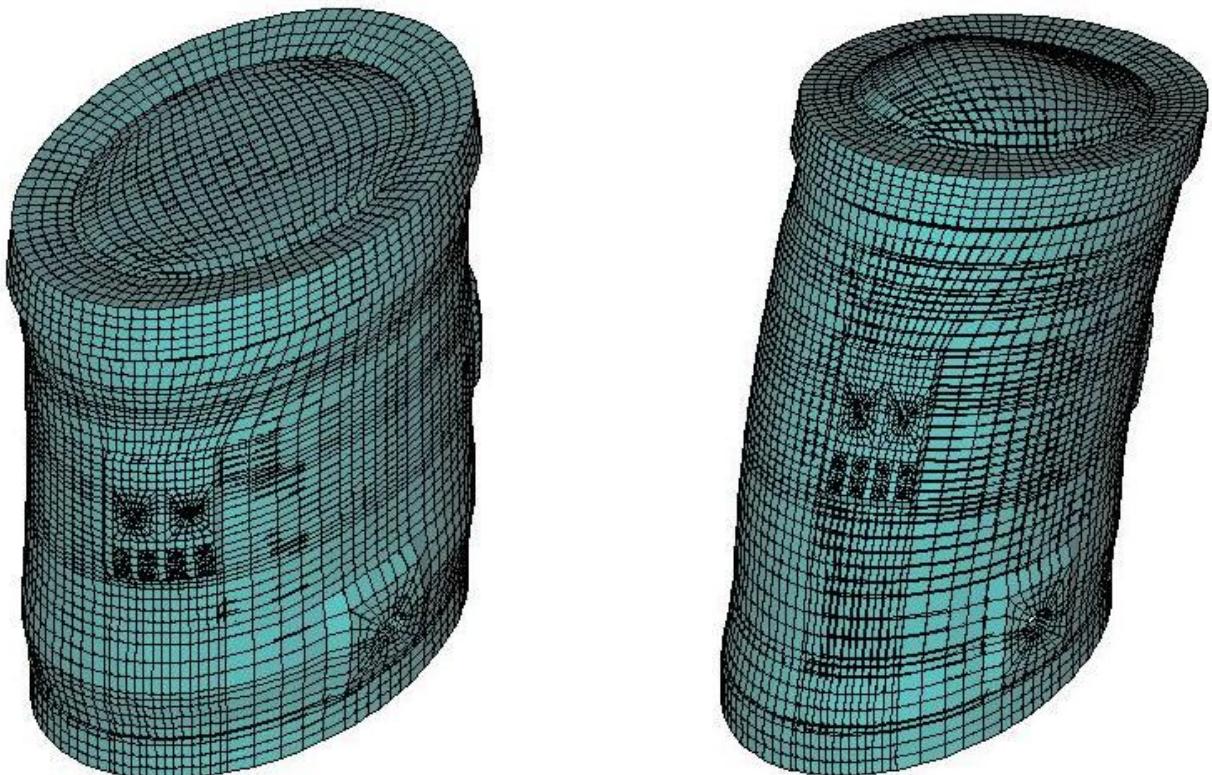


Рис. 4.5 Форми №№ 1, 2 власних коливань захисної оболонки

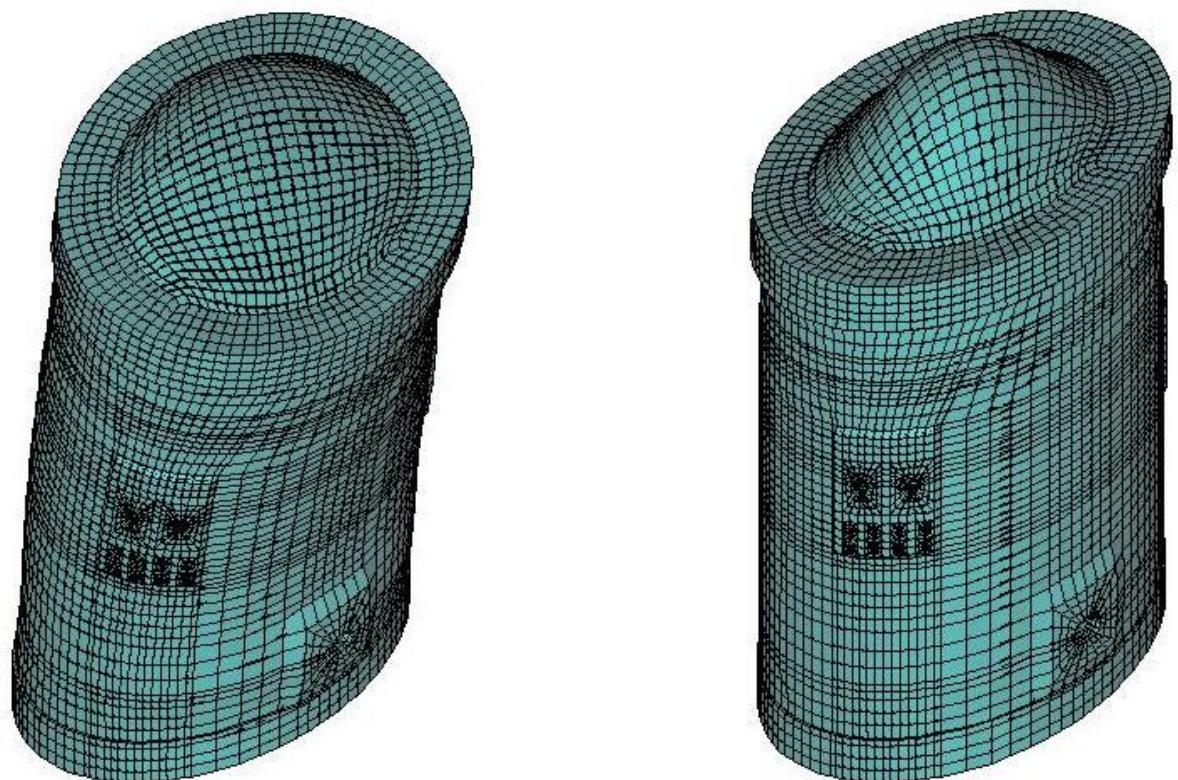


Рис. 4.6 Форми №№ 3, 4 власних коливань захисної оболонки

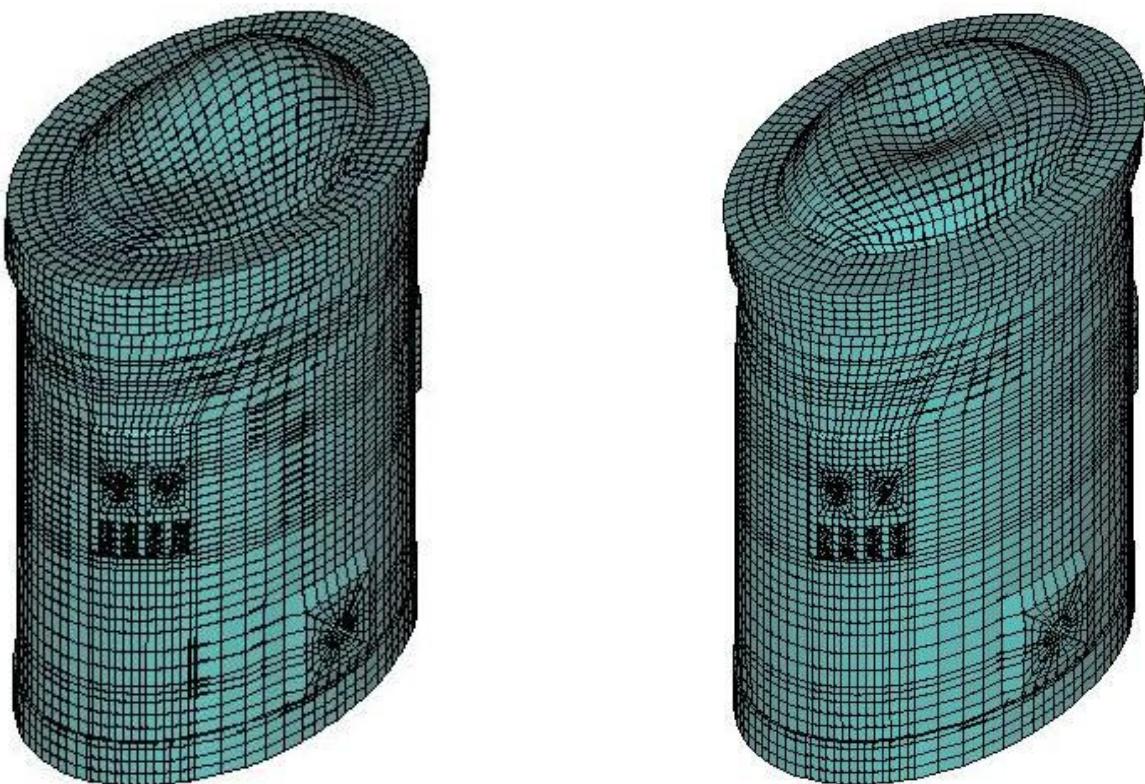


Рис. 4.7 Форми №№ 5, 10 власних коливань захисної оболонки

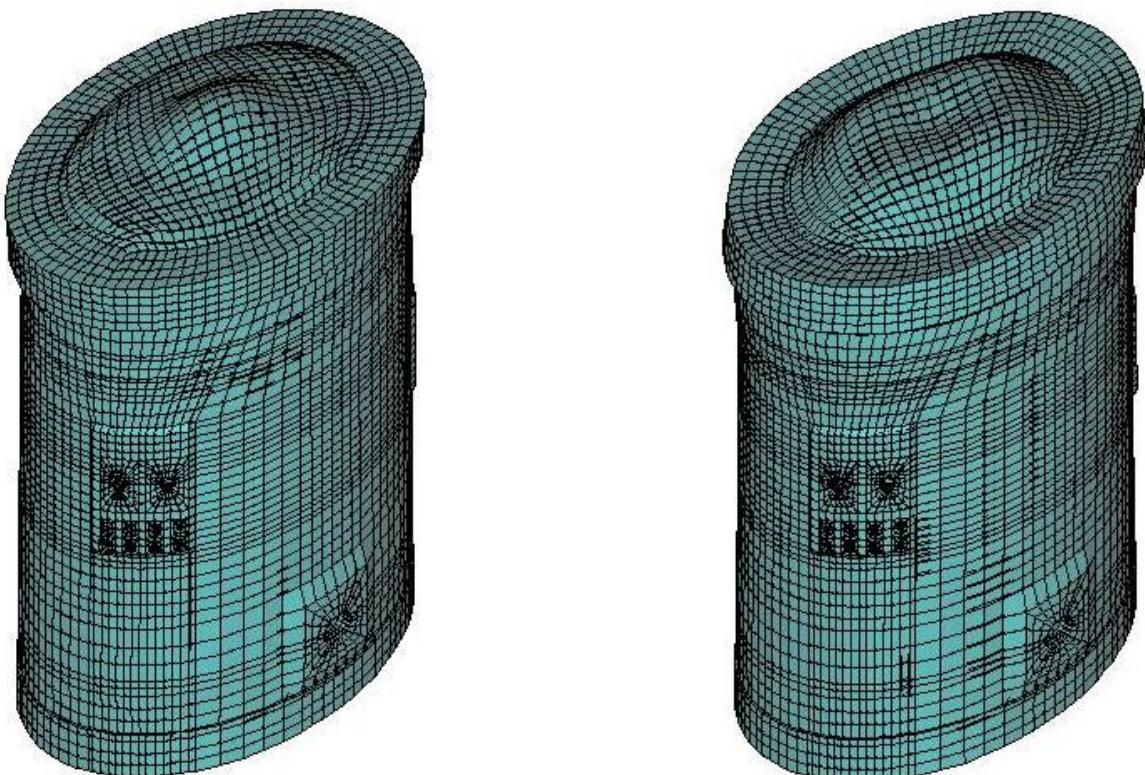


Рис. 4.8 Форми №№ 18, 25 власних коливань захисної оболонки

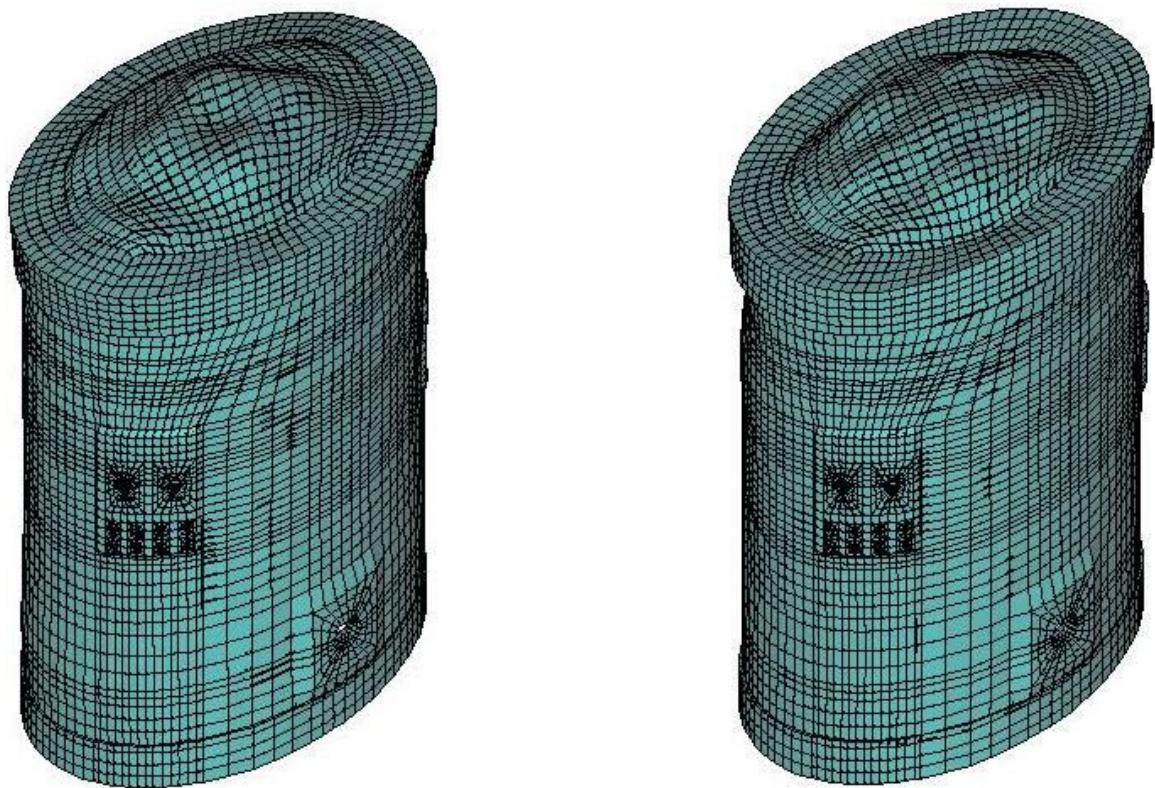


Рис. 4.9 Форми №№ 47, 70 власних коливань захисної оболонки

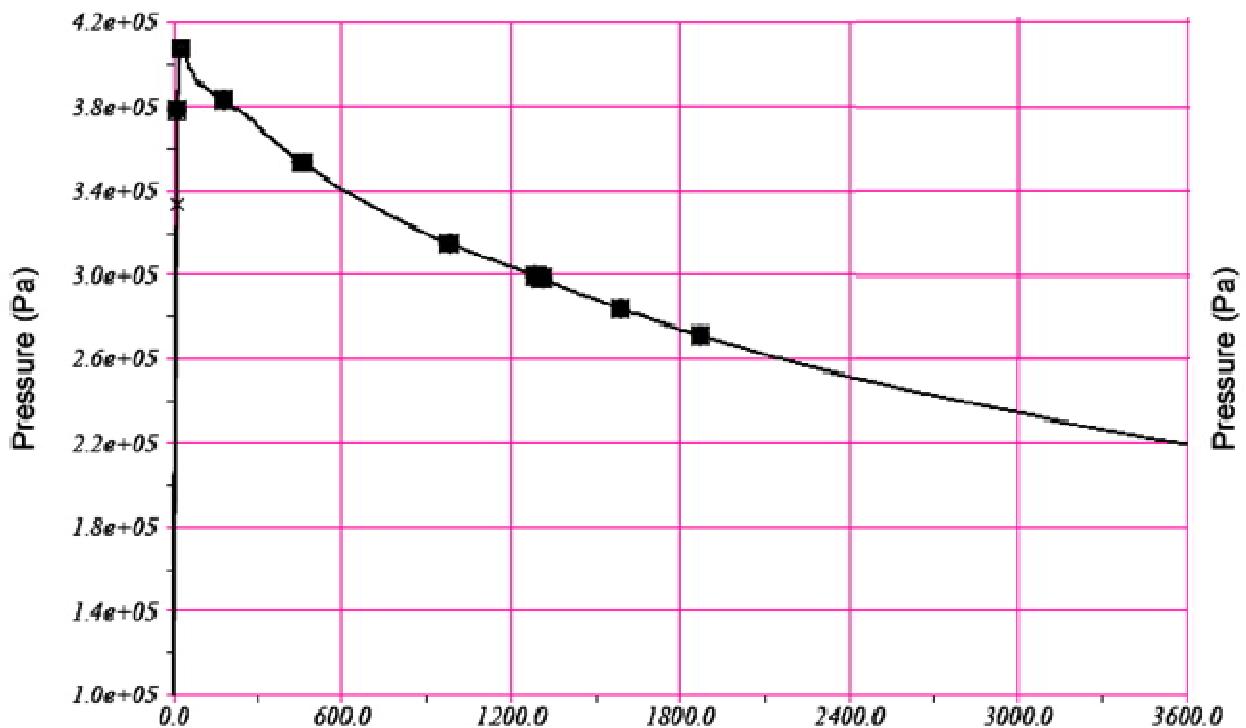


Рис. 4.10 Динаміка розрахункової зміни (стрибку і подальшого зниження) тиску пароповітряного середовища в гермооб'ємі енергоблоку АЕС в умовах максимальної проектної аварії

#### 4.5.2 Результати аналізу динамічної поведінки, НДС і працевдатності ЗО в режимі «МПА+ПЗт»

Зважаючи на положення в п. 2.47 НП 306.2.141-2008 [166] щодо застосування в оцінках безпеки ЯУ консервативного підходу, для розрахунку обрано найбільш несприятливий для ЗО випадок, а саме – прийнято, що реалізація сейсмічного впливу на споруду розпочинається одразу після досягнення аварійним тиском в РВ максимального значення (див. Рис. 4.12 з урахуванням Рис. 4.10 і Рис. 4.11)

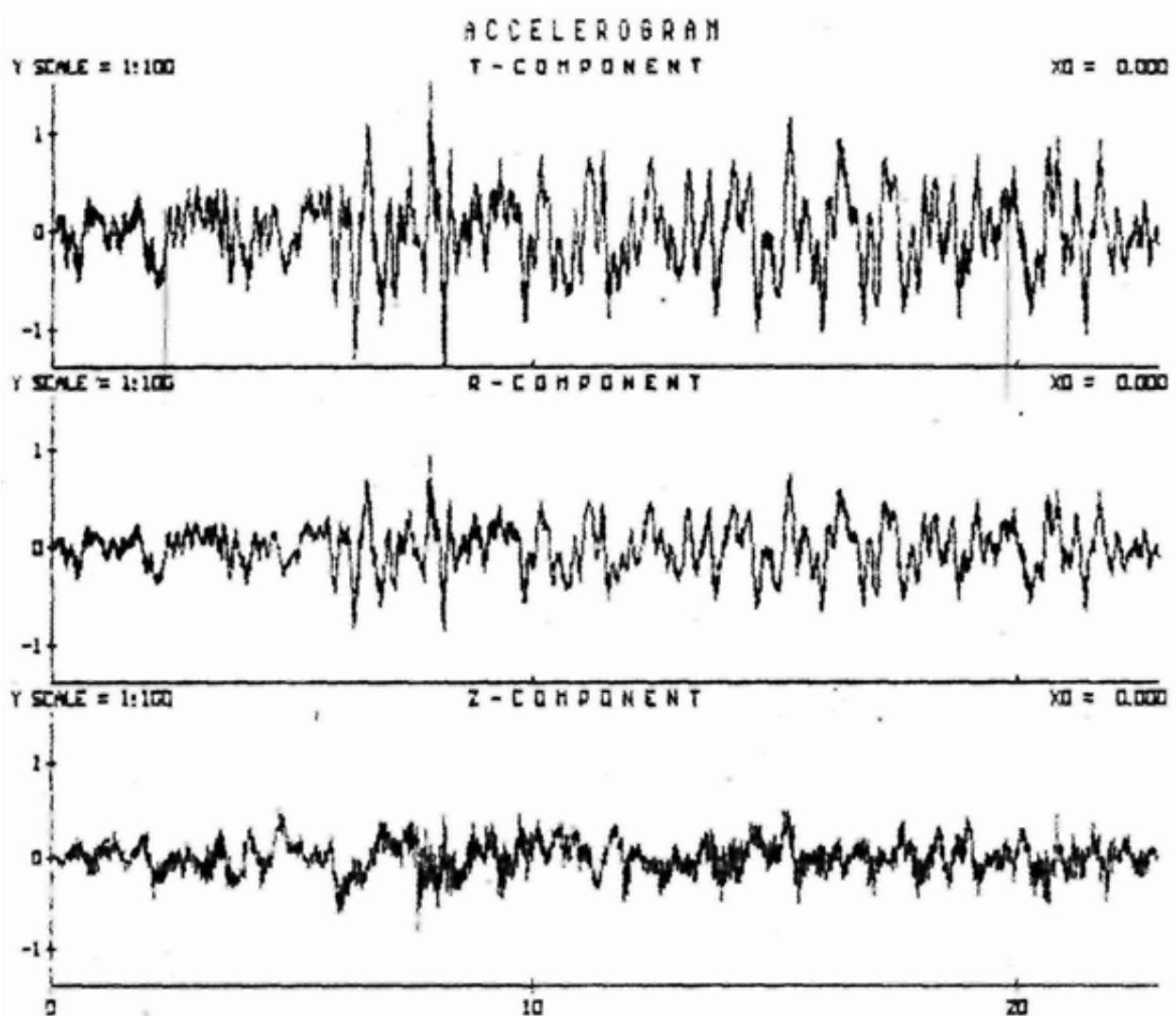


Рис. 4.11 Трикомпонентна поверхова (на висотній позначці 11.800 м ЗО) акселерограма від проектного землетрусу на проммайданчику енергоблоку АЕС

Згідно результатам виконаних розрахунків в режимі «МПА+ПЗт»

максимальна інтенсивність напружень в сталевому гермооблицюванні ЗО складає 195.3 МПа і була зареєстрована в момент часу 16.83 с після початку землетрусу в циліндричній частині ЗО, розташованій на 6.2 м вище опорної поверхні циліндра. Оскільки зазначена інтенсивність напружень не перевищує межу плинності матеріалу ГСО  $\sigma = 195.3 \text{ МПа} < [\sigma] = 245 \text{ МПа}$ , можна стверджувати, що в умовах спільної дії аварійного тиску і проектного землетрусу суцільність сталевого гермооблицювання не буде порушена (запас несучої здатності ГСО становитиме  $(1 - 195.3/245.0) = 20.3\%$ ). Таким чином, працездатність ЗО (виконання спорудою локалізуючої функції) в зазначених умовах буде забезпечена. Деформована форма ЗО, яка відповідає вищевказаному моменту часу, наведена на Рис. 4.13, а ізополя інтенсивності напружень по характерному перерізу ЗО зі шкалою відповідних цифрових значень інтенсивності в  $\text{tс}/\text{m}^2$  – на Рис. 4.14.

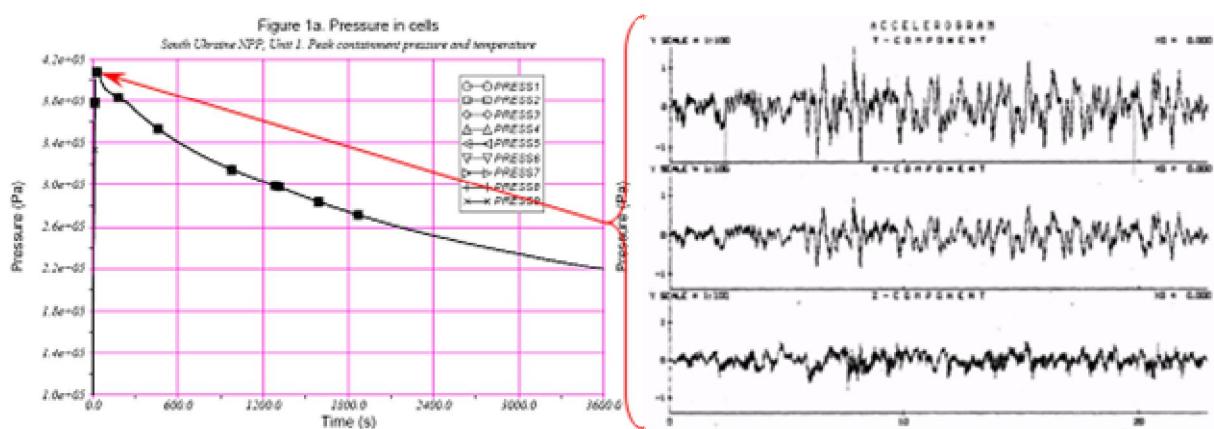


Рис. 4.12 Схема поєднання динамічних навантажень на ЗО від тиску пароповітряного середовища в РВ енергоблоку АЕС в умовах максимальної проектної аварії та від проектного землетрусу

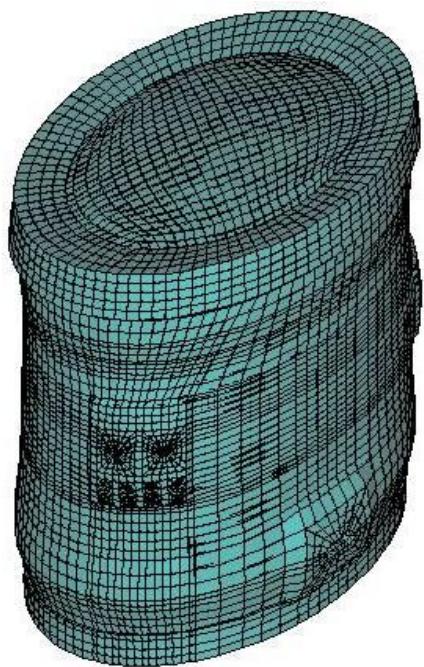


Рис. 4.13 Деформована форма ЗО в режимі «МПА+ПЗт» для стану ЗО з максимальною інтенсивністю напружень в ГСО 195.3 МПа (момент часу 16.83 с після початку землетрусу)

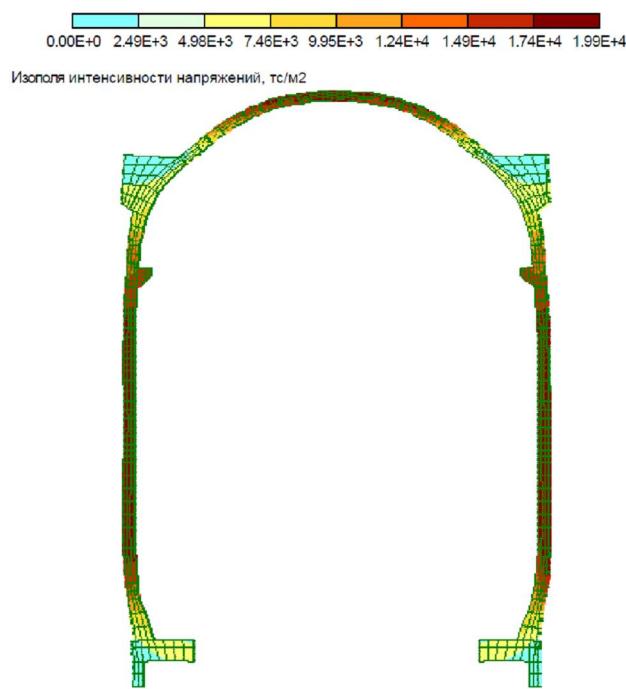


Рис. 4.14 Ізополя інтенсивності напружень по характерному перерізу ЗО в режимі «МПА+ПЗт» для стану ЗО з максимальною інтенсивністю напружень в ГСО 195.3 МПа (момент часу 16.83 с після початку землетрусу)

## 4.6 Дослідження динамічної поведінки, НДС і працездатності ЗО у випадку вибуху повітряно-водневої суміші в РВ в умовах запроектної аварії

### 4.6.1 Постановка задачі і вихідні дані

Згідно дослідженням з безпеки АЕС за напрямком «Аналіз запроектних аварій», результати яких викладені в документі [163], в умовах розвитку вихідної аварійної події «втрата електропостачання власних потреб» можлива реалізація стрибка тиску пароповітряного середовища в РВ і наступна динамічна дія на ЗО повітряної хвилі тиску від вибуху повітряно-водневої суміші, виникнення якої в РВ обумовлено протіканням фізико-хімічних процесів в розплаві активної зони аварійної РУ. В якості початку дії навантаження на ЗО від вибуху повітряно-водневої суміші прийнято момент часу 45000 с після початку розвитку аварії, який характеризується максимальною (0.06) концентрацією водню в гермооб'ємі і відповідним початковим тиском  $2.68 \cdot 10^5$  Па (див. Рис. 4.15, Рис. 4.16) [164]). Як зазначено в [164], при об'ємній концентрації водню 4.1-18.0% відбувається його дефлаграція (горіння), а при об'ємній концентрації водню 18.0-74.0% – детонація повітряно-водневої суміші. Для випадку, який розглядається в цій роботі, (концентрація водню 0.06=6.0%) максимальний тиск у фронті вибухової хвилі для дефлаграційного вибуху повітряно-водневої суміші в гермооб'ємі прийнятий, виходячи з залежностей, наведених на Рис. 4.16, Рис. 4.17 [згідно 164], і дорівнює:

$$p_{\max} = 2.68 \cdot 10^5 \cdot 3 = 8.04 \cdot 10^5 \text{ Па} = 0.804 \text{ МПа}. \quad (4.7)$$

Відповідно до результатів досліджень, наведених в роботі [165], вказане значення максимального тиску відкориговане множенням на коефіцієнт 1.75, який консервативно враховує взаємодію (накладення) падаючої і відбитої ударних хвиль при вибуху в замкненому об'ємі, тобто:

$$p_{\max 1} = 0.804 \cdot 1.75 = 1.407 \text{ МПа} = 13.886 \approx 13.9 \text{ атм}. \quad (4.8)$$

Отримане значення  $p_{\max 1} = 13.9$  атм кореспондується з величиною тиску 11 атм, яке наведена в роботі [166]. Розрахункові функції зміни тиску від вибуху повітряно-водневої суміші в діапазоні значень тисків від 0.268 до 1.407 МПа по висоті стінки ЗО і в часі притяті в конфігураціях, наведених на Рис. 4.18, Рис. 4.19

(згідно джерелу [166]).

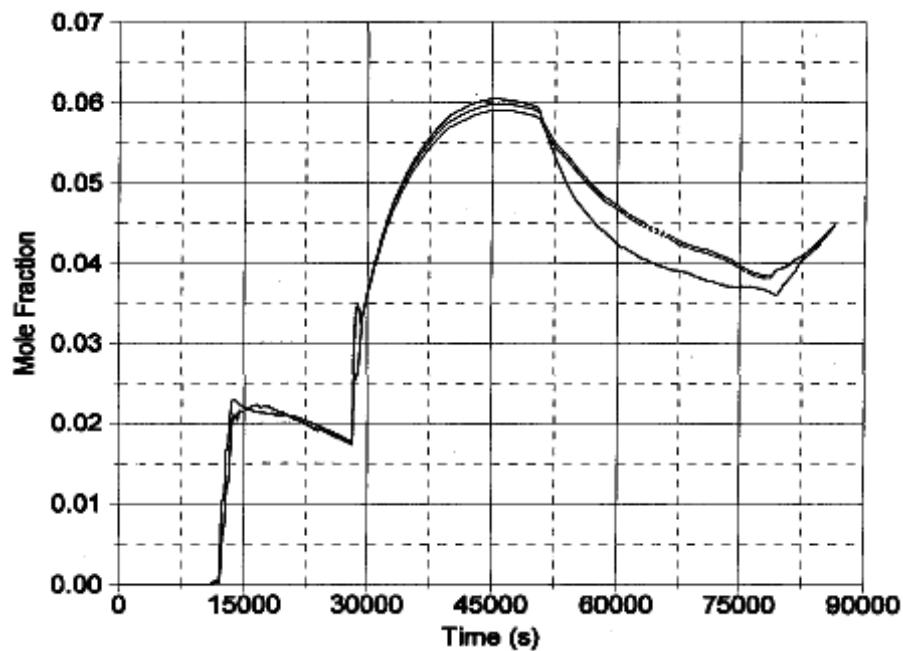


Рис. 4.15 Графік зміни концентрації водню в гермооб'ємі РВ енергоблоку АЕС в умовах ЗПА, яка розглядається

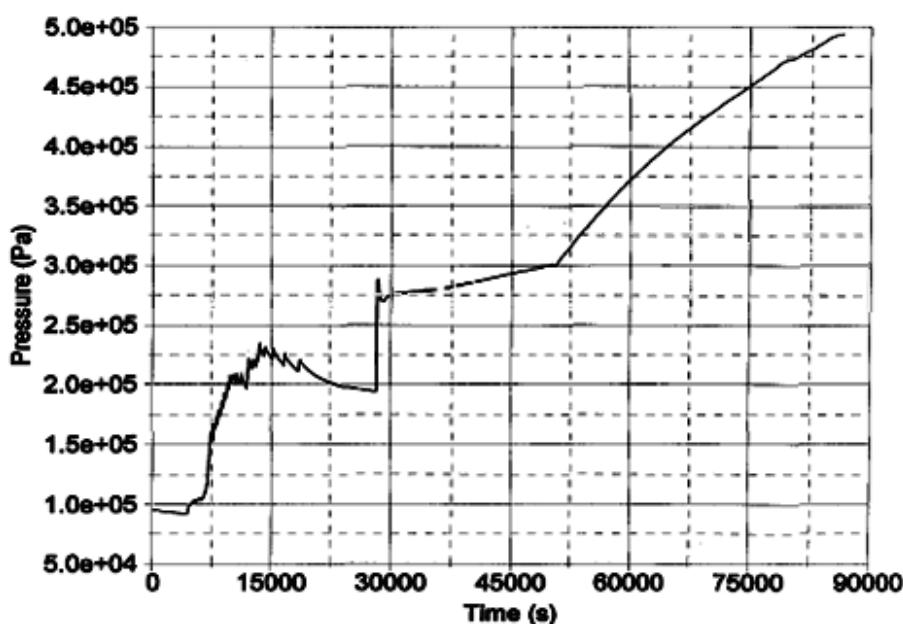


Рис. 4.16 Графік зміни тиску пароповітряного середовища в гермооб'ємі РВ енергоблоку АЕС в умовах ЗПА, яка розглядається

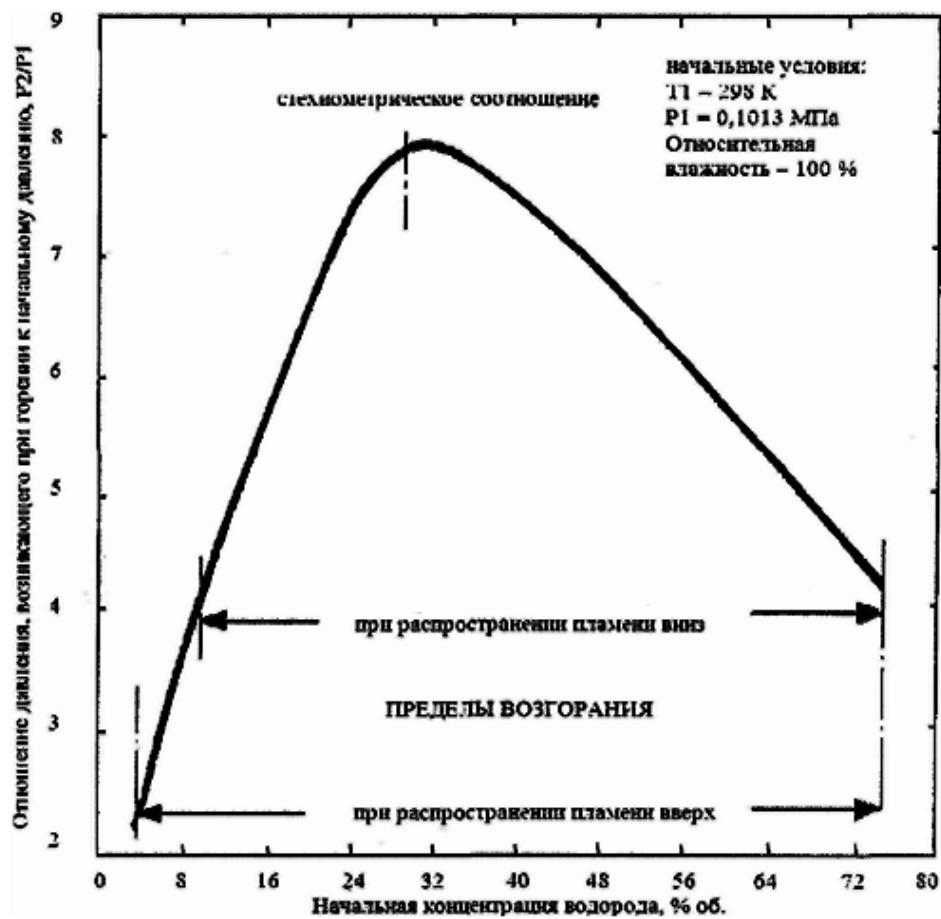


Рис. 4.17 Графік зростання тиску при горінні повітряно-водневої суміші в замкненому об'ємі

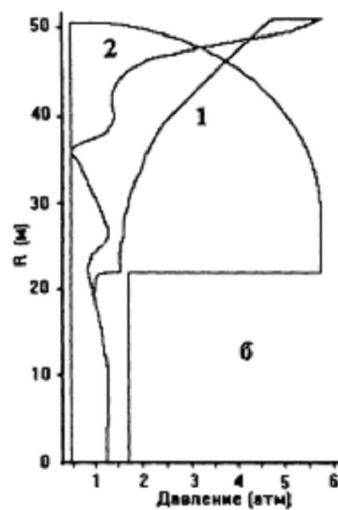


Рис. 4.18 Розподіл тиску в гермооб'ємі – (1) на стінці ЗО; (2) по осі симетрії РВ – на момент досягнення максимального тиску в вершині купола ЗО при миттєвому вибуху повітряно-водневої суміші в шахті реактора (згідно [166])

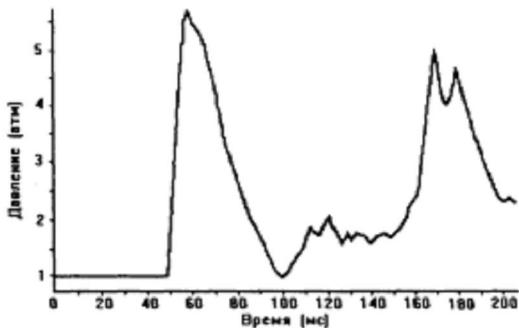


Рис. 4.19 Графік зміни тиску в вершині купола ЗО при миттєвому вибуху повітряно-водневої суміші в шахті реактора (згідно [166])

#### 4.6.2 Результати аналізу динамічної поведінки, НДС і працездатності ЗО в режимі «ЗПА + вибух повітряно-водневої суміші в РВ»

Згідно результатам виконаних розрахунків в режимі «ЗПА+вибух повітряно-водневої суміші в РВ» максимальна інтенсивність напружень в сталевому гермооблицюванні ЗО склала 261.7 МПа і була зареєстрована в момент часу 6.83 мс після проходження пікової інтенсивності тиску на ЗО від вибуху повітряно-водневої суміші 1.407 МПа, в циліндричній частині ЗО, розташованій на 36.2 м вище опорної поверхні циліндра. Зазначена інтенсивність напружень перевищує межу плинності матеріалу ГСО  $\sigma=261.7 \text{ МПа} > [\sigma] = 245.0 \text{ МПа}$  на  $(261.7/245.0 - 1) = 6.8\%$ . Але, приймаючи до уваги ефект динамічного зміщення, який має місце при швидкоплинних динамічних процесах (високих швидкостях деформацій) і характеризується підвищеннем межі плинності метала в 1.2-1.3 рази [167], а межі міцності бетону на 20-40% [168], можна стверджувати, що в розглянутих аварійних умовах (режим «ЗПА + дефлаграційний вибух повітряно-водневої суміші в РВ») суцільність сталевого гермооблицювання не буде порушена (запас несучої здатності ГСО з урахуванням динамічного зміщення консервативно становитиме  $(1 - 261.7/(1.2*245.0)) = 11.0\%$ ). Таким чином, працездатність ЗО (виконання спорудою локалізуючої функції) в зазначених умовах буде забезпечена. Деформована форма ЗО, яка відповідає вищевказаному моменту часу, наведена на Рис. 4.20, а ізополя інтенсивності напружень по характерному перерізу ЗО зі шкалою відповідних цифрових значень інтенсивності в  $\text{tc/m}^2$  – на Рис. 4.21.

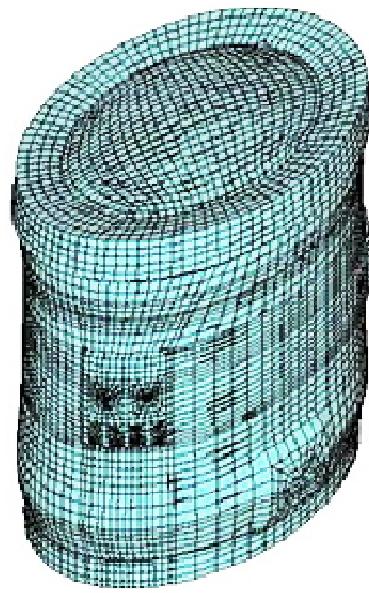


Рис. 4.20 Деформована форма ЗО в режимі «ЗПА+вибух повітряно-водневої суміші в РВ» для стану ЗО з максимальною інтенсивністю напружень в ГСО 261.7 МПа (момент часу 6.83 мс після пікового рівня тиску від вибуху)

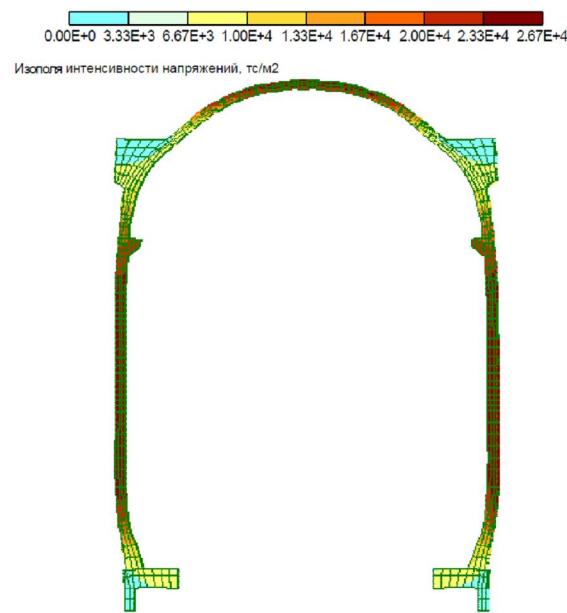


Рис. 4.21 Ізополя інтенсивності напружень по характерному перерізу ЗО в режимі «ЗПА+вибух повітряно-водневої суміші в РВ» для стану ЗО з максимальною інтенсивністю напружень в ГСО 261.7 МПа (момент часу 6.83 мс після пікового рівня тиску від вибуху)

#### **4.7 Впровадження результатів розрахунків НДС і динамічної поведінки ЗО АЕС при короткочасних навантаженнях в умовах проектної і запроектної аварій**

Результати дисертаційної роботи – розроблена методологія аналізу НДС і динамічної поведінки конструкцій, обчислювальні алгоритми, розрахункова МСЕ-модель ЗО, результати виконаних розрахунків працездатності ЗО в умовах максимальної проектної і запроектної аварій, а також ПЗ «ДИПРОС», з використанням якого були реалізовані зазначені методологія, алгоритми, МСЕ-модель і виконані зазначені розрахунки – були впроваджені в ряді науково-дослідних закладів, проектно-конструкторських організацій і виробничих підприємств, пов’язаних своєю підпорядкованістю та/або змістом конкретних виконуваних робіт з енергетичною галуззю України. А саме (також див. «Додаток А» і «Додаток Б»):

- 1) **Публічне акціонерне товариство «Київський науково-дослідний та проектно-конструкторський інститут «Енергопроект»**, м. Київ – результати дисертаційної роботи, які стосуються визначення НДС і оцінок суцільності ГСО ЗО РВ енергоблоку АЕС в умовах МПА і ЗПА, були використані при розробці звітів з аналізу безпеки (розділів «Аналіз проектних аварій» і «Аналіз запроектних аварій») енергоблоків з РУ ВВЕР-1000/В-320 Рівненської і Хмельницької АЕС.
- 2) **Товариство з обмеженою відповідальністю «ТЕКО Інтерфейс**, м. Київ – розроблені в дисертаційній роботі методологія, обчислювальні алгоритми і ПЗ «ДИПРОС» – були використані в процесі розробки обґрунтувань сейсмостійкості важливого для безпеки фільтровентиляційного обладнання, розташованого в будівлі установки з підготовки ВЯП до зберегання (УПВПЗ) сховища ВЯП (СВЯП-2) Чорнобильської АЕС.
- 3) **Державне підприємство «Державний науково-технічний центр з ядерної та радіаційної безпеки» Держatomрегулювання України і НАН України**, м. Київ – розроблені в дисертаційній роботі обчислювальні алгоритми і ПЗ «ДИПРОС» застосовувались для виконання альтернативних експертних (розрахункових) оцінок матеріалів обґрунтування працездатності (збереження локалізуючої функції) системи герметичного огороження реакторного відділення

енергоблоку № 1 ВП «Южно-Українська АЕС» в умовах максимальної проектної і запроектних аварій (при динамічному впливі на ЗО землетрусу на проммайданчику АЕС та/або дефлаграційного вибуху повітряно-водневої суміші всередині РВ) в період проектного і понадпроектного терміну експлуатації енергоблоку АЕС.

4) **Державне підприємство «Державний науково-інженерний центр систем контролю і аварійного реагування» Міністерства енергетики і вугільної промисловості України, м. Київ** – методологія, обчислювальні алгоритми і ПЗ «ДИПРОС» – використовувались при розробці альтернативних (призначених для порівняльних оцінок) розрахункових обґрунтувань НДС, коливань і міцності упаковок (контейнерів) для ВЯП в аварійних умовах, пов’язаних з динамічними (ударними) впливами на упаковки ВЯП, а саме – при падінні упаковок внаслідок відмови вантажепід’йомного обладнання на абсолютно жорстку та/або обмежено підатливу основу.

5) **Відкрите акціонерне товариство «Харківський науково-дослідний та проектно-конструкторський інститут «Енергопроект»», м. Харків** – результати дисертаційної роботи, які стосуються визначення НДС і оцінок суцільності ГСО ЗО РВ енергоблоку АЕС в умовах МПА і ЗПА, були використані при розробці проектних документів, які обґрунтують можливість експлуатації енергоблоку № 1 ВП «Южно-Українська АЕС» (зокрема, локалізуючої системи безпеки – гермоогороження реакторного відділення) в понадпроектний період.

6) **Відокремлений підрозділ (ВП) «Южно-Українська АЕС» Державного підприємства «Національна енергогенеруюча компанія «Енергоатом» Міністерства енергетики і вугільної промисловості України, м. Южноукраїнськ Миколаївської обл.** – результати дисертаційної роботи, які стосуються визначення НДС і оцінок цілісності (суцільності) ГСО ЗО РВ енергоблоку АЕС в умовах МПА і ЗПА були використані при розробці документації з обґрунтування безпеки експлуатації енергоблоків №№ 1, 2 ВП «Южно-Українська АЕС» (зокрема, працездатності ЗО РВ) в понадпроектний період.

7) **Інститут проблем міцності ім. Г.С.Писаренка НАН України, м. Київ** – результати дисертаційної роботи щодо НДС ЗО РВ енергоблоку АЕС з РУ ВВЕР-1000/В-302 в аварійних умовах, використовувались в якості порівняльної

інформації в рамках науково-технічної роботи «Определение напряженно-деформированного состояния и работоспособности защитной оболочки энергоблока № 1 ОП «Южно-Украинская АЭС» в условиях гипотетической тяжелой (запроектной) аварии».

8) **Інститут математики НАН України**, м. Київ – результати дисертаційної роботи щодо НДС ЗО РВ енергоблоку АЕС з РУ ВВЕР-1000/В-302 в аварійних умовах, використовувались в якості вихідної та/або порівняльної інформації в рамках науково-дослідної роботи «Механіко-математичне моделювання і розрахунковий аналіз термомеханічної поведінки, працездатності і локалізуючої здатності захисної оболонки реакторного відділення енергоблоку № 1 ВП «Південно-Українська АЕС» в умовах спільної дії екстремальних природно-технологічних подій – максимального розрахункового землетрусу і максимальної проектної (запроектної) аварії», яка виконувалась згідно Цільовій програмі наукових досліджень НАН України «Науково-технічний супровід розвитку ядерної енергетики та застосування радіаційних технологій у галузях економіки» відповідно до розпорядження Президії НАН України від 31.05.2011 № 365.

9) **Державне підприємство «Державний науково-дослідний інститут будівельних конструкцій» (ДП НДІБК)**, м. Київ – результати дисертаційної роботи – відомості про параметри розрахункової МСЕ-моделі, НДС і динамічні характеристики (частоти і форми власних коливань) ЗО РВ енергоблоку АЕС в умовах «МПА+ПЗт» використовувались в якості порівняльної інформації в рамках науково-технічної роботи «Разработка расчетной модели защитной оболочки энергоблока АЭС с ВВЭР-1000 типа В-302 для определения минимально допустимых усилий натяжения армоканатов СПЗО и оценки прочности и надежности СГО ЛСБ в условиях сочетания проектной аварии и проектного землетрясения».

Також в документах про впровадження (див. «Додаток А» і «Додаток Б») вказано, що розроблені і практично реалізовані в процесі виконання дисертаційної роботи методологія, обчислювальні алгоритми і програмний засіб «ДІПРОС» для розрахунку НДС і динамічної поведінки оболонкових конструкцій являють собою практичну цінність і є перспективними для застосування в інженерній діяльності.

#### **4.8 Висновки по розділу 4**

1 Для дослідження динамічної поведінки, НДС і працездатності ЗО енергоблоку АЕС при короткочасних навантаженнях в умовах проектної і запроектної аварій розроблена МСЕ-модель наступної розмірності: 21062 СЕ, 28547 вузлів, 85641 невідомих системи розв'язуючих рівнянь МСЕ (вузлових переміщень). Реалізована розрахункова модель ЗО являє собою багатофрагментну квазірегулярну (регулярну в межах кожного фрагмента) 4-ришарову сіткову область. Необхідна для забезпечення прийнятної точності розрахунків густина МСЕ-сітки була визначена за результатами виконання серії обчислювальних експериментів.

2 Прийнято, що в межах об'єму одного СЕ матеріал ЗО є ізотропним. Приведені розрахункові фізико-механічні характеристики матеріалу кожного шару враховують фізико-механічні характеристики бетону, ненапруженої та/або попередньо напруженої арматури, наявність пустот-каналоутворювачів тощо.

3 Критерієм відмови ЗО (втрати локалізуючої функції) прийнято факт порушення суцільності ГСО у вигляді розриву основного металу листів ГСО та/або зварних швів, які з'єднують такі листи. Умовою досягнення вказаного критерію відмови прийнято досягнення/перевищення інтенсивністю напружень в матеріалі межі плинності металу. Зазначений критерій, відомий в технічній літературі як умова плинності Губера – Мізеса – Генки.

4 Розрахунок НДС і динамічної поведінки ЗО виконувався для умов дії на споруду наступних навантажень і впливів

- власна вага конструкцій споруди;
- зусилля обтиснення споруди арматурними канатами СПЗО;
- аварійний тиск пароповітряної суміші в умовах МПА або ЗПА;
- сейсмічний вплив від проектного землетрусу інтенсивністю 6 балів (для випадку МПА) або вплив (тиск) повітряної ударої хвилі внаслідок вибуху повітряно-водневої суміші в підбобонковому просторі в умовах ЗПА.

5 З метою обґрунтування коректності розробленої розрахункової МСЕ-моделі ЗО енергоблоку АЕС і застосованих обчислювальних алгоритмів моделювання динамічної поведінки ЗО, адекватності МСЕ-моделі реальній споруді

і достовірності отримуваних результатів розрахунків НДС була виконана комплексна верифікація розробленої МСЕ-моделі ЗО шляхом порівняння результатів розрахунків ЗО з тестовими задачами, що мають аналітичні рішення, з результатами розрахунків іншими (альтернативними) програмними засобами, з результатами натурних спостережень за спорудою ЗО при інтегральних передексплуатаційних випробуваннях ЗО на міцність.

6 За результатами модального аналізу МСЕ-моделі ЗО були отримані 100 форм власних коливань моделі (і відповідних їм частот) нижньої частини повного спектра частот власних коливань ЗО. З зазначеної сукупності форм коливань лише 7 форм виявились «суттєво збуджуваними» (енергетично ємними) і такими, що мають високу модальну масу і, відповідно, суттєво впливають на динамічну поведінку об'єкта.

7 Результатами розрахунків доведено, що в умовах спільної дії аварійного тиску і проектного землетрусу, а також в умовах запроектної аварії (обумовленої вихідною подією «втрата електропостачання власних потреб») з вибухом повітряно-водневої суміші в реакторному відділенні цілісність сталевого гермооблицювання не буде порушена (запас несучої здатності ГСО становитиме, відповідно, 20.3% і 11.0%), тобто, працездатність ЗО (виконання спорудою локалізуючої функції) буде забезпечена.

8 Результати дисертаційної роботи – розроблена методологія аналізу НДС і динамічної поведінки конструкцій, обчислювальні алгоритми, розрахункова МСЕ-модель ЗО, результати виконаних розрахунків працездатності ЗО в умовах максимальної проектної і запроектної аварій, а також ПЗ «ДИПРОС», з використанням якого були реалізовані зазначені методологія, алгоритми, МСЕ-модель і виконані зазначені розрахунки – були впроваджені в ряді науково-дослідних закладів, проектно-конструкторських організацій і виробничих підприємств, пов'язаних своєю підпорядкованістю та/або змістом конкретних виконуваних робіт з енергетичною галуззю України.

## ВИСНОВКИ

Дисертація є самостійною науковою роботою. Основними науковими результатами, які отримані в дисертаційній роботі є наступне:

- виконано постановку задачі аналізу НДС і динамічної поведінки одинарних залізобетонних, попередньо напруженіх циліндричних ЗО з пологим сферичним куполом, на внутрішній поверхні яких влаштовано герметизуюче сталеве облицювання;
- для розрахунку НДС і динамічної поведінки ЗО використано модифікацію методу скінчених елементів – моментну схему скінчених елементів – а також розроблений автором програмний засіб для ЕОМ «ДИПРОС», який реалізує зазначений математичний аппарат;
- виконано відповідну ефективну модифікацію обчислювальних алгоритмів розв'язання рівнянь руху МСЕ-моделі при розрахункових динамічних навантаженнях (стрибок внутрішнього тиску в ЗО в умовах максимальної проектної аварії і наступного сейсмічного впливу на ЗО від проектного землетрусу);
- з використанням МСЕ і проблемно-орієнтованого програмного засобу «ДИПРОС» виконано аналіз динамічної поведінки залізобетонної захисної оболонки реакторного відділення енергоблоку АЕС при спільній дії стрибка внутрішнього тиску в ЗО в умовах МПА і наступного сейсмічного впливу на ЗО від проектного землетрусу;
- розроблені математичний апарат і програмний комплекс «ДИПРОС» надали можливість виконати аналіз НДС і динамічної поведінки ЗО при вибуху в реакторному відділенні енергоблоку АЕС повітряно-водневої суміші в умовах запроектної аварії;
- продемонстровано, що із 100 форм власних коливань ЗО (і відповідних їм частот) нижньої частини повного спектру власних коливань споруди лише 7 форм є «суттєво збуджуваними» (енергетично ємними) – тобто такими, що мають високу модальну масу, і значно впливають на динамічну поведінку об'єкту;
- результатами розрахунків доведено, що в умовах спільної дії аварійного тиску і проектного землетрусу, а також в умовах запроектної аварії (обумовленої

вихідною подією «втрата електропостачання власних потреб») з вибухом повітряно-водневої суміші в реакторному відділенні цілісність сталевого гермооблицювання не буде порушенна (запас несучої здатності ГСО становитиме, відповідно, 20.3% і 11.0%), тобто, працездатність ЗО (виконання спорудою локалізуючої функції) буде забезпечена.

**ДОДАТОК А**

**ДОКУМЕНТИ ЩОДО ВПРОВАДЖЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ  
ДИСЕРТАЦІЙНОЇ РОБОТИ В ПРОЕКТНО-  
КОНСТРУКТОРСЬКИХ ОРГАНІЗАЦІЯХ І НА ПІДПРИЄМСТВАХ  
ЕНЕРГЕТИЧНОЇ ГАЛУЗІ УКРАЇНИ**



У КРАЇНА  
ПУБЛІЧНЕ АКЦІОНЕРНЕ ТОВАРИСТВО  
«КІЇВСЬКИЙ НАУКОВО-ДОСЛІДНИЙ ТА  
ПРОЕКТНО-КОНСТРУКТОРСЬКИЙ ІНСТИТУТ  
**«ЕНЕРГОПРОЕКТ»**

01135, м.Київ-135, пр. Перемоги, 4  
телефон 236-09-32, факс (044) 246-59-82, E-mail: enprojct@kiep.kiev.ua

« 04 » 05 2016 р.  
№ 101. 018, кр 4  
На № \_\_\_\_\_

**С П Р А В К А**

о внедрении в проектную деятельность ПАО «Киевский научно-исследовательский и проектно-конструкторский институт «Энергопроект» (КИЭП) материалов диссертационной работы «Численное моделирование динамики защитных оболочек атомных электростанций при кратковременных нагрузках» (специальность 01.02.04 – механика деформируемого твердого тела)  
старшего научного сотрудника ГНТЦ ЯРБ  
**Крицкого Владимира Борисовича**

Полученные в диссертационной работе Крицкого В.Б. результаты, касающиеся напряженно-деформированного состояния (НДС) и сохранения сплошности (целостности) герметизирующей стальной облицовки защитной оболочки (ЗО) АЭС в условиях максимальной проектной и запроектных аварий (в сочетании с динамическими воздействиями от проектного землетрясения и взрыва воздушно-водородной смеси в реакторном отделении энергоблока АЭС), были использованы специалистами КИЭП при разработке отчетов по анализу безопасности (разделов «Анализ проектных аварий» и «Анализ запроектных аварий») энергоблоков ВВЭР-1000/В-320 Ривненской и Хмельницкой АЭС.

Результаты диссертационной работы Крицкого В.Б. имеют несомненную практическую ценность и могут быть рекомендованы к широкому использованию в инженерной практике, в частности (при условии соответствующей адаптации расчетной МКЭ-модели ЗО) для расчетного анализа НДС и динамического поведения защитных оболочек энергоблоков АЭС Украины с реакторными установками типа ВВЭР-1000/В-320.

Главный инженер



В.Н.Чернавский

# TEKO INTERFACE

ТОВ „ТЕКО Інтерфейс” • 03022 м. Київ, вул. Ломоносова, 73 г

Ісх. № 0512 от 12 мая 2016р.

## С П Р А В К А

о внедрении в производственно-техническую деятельность ООО «ТЕКО  
Интерфейс» результатов диссертационной работы «Численное  
моделирование динамики защитных оболочек атомных электростанций при  
кратковременных нагрузках» (специальность 01.02.04 – механика  
деформируемого твердого тела) старшего научного сотрудника  
ГП «Государственный научно-технический центр по ядерной и радиационной  
безопасности» (ГНТЦ ЯРБ)  
**Крицкого Владимира Борисовича**

Результаты диссертационной работы Крицкого В.Б. – методология, расчетные алгоритмы и программное средство «ДИПРОС» – были использованы ООО «ТЕКО Интерфейс» при разработке расчетных обоснований сейсмостойкости важного для безопасности фильтровентиляционного оборудования, расположенного в здании установки по подготовке отработавшего топлива к хранению (УПОТХ) хранилища отработавшего ядерного топлива (ХОЯТ-2) ДСП «Чернобыльская АЭС». Указанные расчетные обоснования явились основой разработанных проектных документов «Чернобыльская АЭС. Объект ХОЯТ-2. Здание установки по подготовке отработавшего топлива к хранению (УПОТХ). Система вентиляции CAVS-E-1. Расчетный анализ сейсмостойкости фильтровальных секций. 24090002.70939.05.07.05.01-01 РР» и «Чернобыльская АЭС. Объект ХОЯТ-2. Здание установки по подготовке отработавшего топлива к хранению (УПОТХ). Система вентиляции горячей камеры. Приточная система HCVS-S, вытяжная система HCVS-E. Расчетный анализ сейсмостойкости механических и фильтровальных секций установок KLG-350 и KLG-130. 24090002.70940.05.07.05.01-01 РР».

Директор



И.П. Панько



**ДНТЦ ЯРБ**

ДЕРЖАВНЕ ПІДПРИЄМСТВО  
“ДЕРЖАВНИЙ НАУКОВО-ТЕХНІЧНИЙ ЦЕНТР  
З ЯДЕРНОЇ ТА РАДІАЦІЙНОЇ БЕЗПЕКИ”

вул. Василя Стуса, 35-37, м.Київ, 03142, Україна, а/с 124, тел.: (044) 450-05-00, факс: (044) 452-89-90, e-mail: nrs@sstc.kiev.ua  
П/р 26001012713239 в філії АТ “Укрексімбанк” в м.Києві МФО 380333 КОД ЄДРПОУ 14282338 www.sstc.kiev.ua

13.05.2016 № 200/1318

На № \_\_\_\_\_ від \_\_\_\_\_

## Д О В І Д К А

про впровадження в експертну діяльність ДП «Державний науково-технічний центр з ядерної та радіаційної безпеки» матеріалів дисертаційної роботи «Чисельне моделювання динаміки захисних оболонок атомних електростанцій при короткочасних навантаженнях» (спеціальність 01.02.04 – механіка деформівного твердого тіла)  
старшого наукового співробітника ДНТЦ ЯРБ  
**Крицького Володимира Борисовича**

Розроблені в дисертаційній роботі Крицького В.Б. розрахункова скінчено-елементна модель захисної оболонки (ЗО) реакторної установки ВВЕР-1000 (типов В-302, В-338), обчислювальні алгоритми і програмний засіб «ДПРОС» для аналізу напружене-деформованого стану (НДС) і динамічної поведінки тонкостінних просторових (оболонкових), а також результати розрахунків ЗО використовувались фахівцями ДНТЦ ЯРБ для виконання альтернативних експертних оцінок матеріалів обґрунтування працевздатності (збереження локалізуючої функції) системи герметичного огороження реакторного відділення енергоблоку № 1 ВП «Южно-Українська АЕС» в умовах максимальної проектної і запроектних аварій (при динамічному впливі на ЗО землетрусу на проммайданчику АЕС та/або дефлаграційного вибуху повітряно-водневої суміші всередині РВ) в період проектного і понадпроектного терміну експлуатації енергоблоку АЕС.

Розроблені і практично реалізовані Крицьким В.Б. в процесі виконання дисертаційної роботи методологія, обчислювальні алгоритми і програмний засіб «ДПРОС» для розрахунку НДС і динамічної поведінки оболонкових конструкцій представляють собою практичну цінність і є перспективними для застосування в інженерній діяльності.

Директор



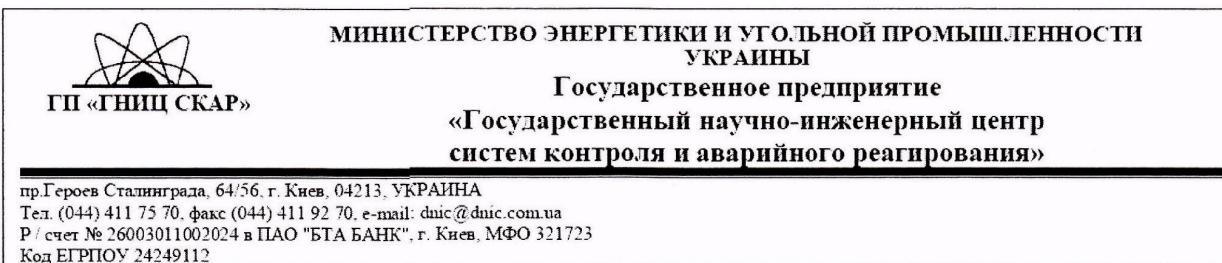
I.A.Шевченко

Шугайло  
422-4953 (вн. 3-06)



 ETSON

EUROPEAN  
TECHNICAL SAFETY  
ORGANISATIONS  
NETWORK



19.05.2016 № \_\_\_\_\_ На № \_\_\_\_\_ від \_\_\_\_\_

## С П Р А В К А

о внедрении в научно-техническую деятельность ГП «Государственный научно-инженерный центр систем контроля и аварийного реагирования»  
(ГП «ГНИЦ СКАР») материалов диссертационной работы

**Крицкого Владимира Борисовича**

«Численное моделирование динамики защитных оболочек атомных  
электростанций при кратковременных нагрузках»  
(специальность 01.02.04 – механика деформируемого твердого тела)

Результаты диссертационной работы Крицкого В.Б. – методология, расчетные алгоритмы и программное средство «ДИПРОС» – были использованы ГП «ГНИЦ СКАР» при разработке альтернативных (предназначенных для сопоставительных оценок) расчетных обоснований напряженно-деформированного состояния (НДС), колебаний и прочности упаковок для отработавшего ядерного топлива (ОЯТ) в аварийных условиях, связанных с динамическими (ударными) воздействиями на упаковки ОЯТ, а именно – при падении упаковок вследствие отказа грузоподъемного оборудования на абсолютно жесткое и/или ограничено податливое основание.

Указанные расчетные обоснования были учтены при разработке проектного документа ГП НАЭК «Энергоатом» «Предварительный отчет по анализу безопасности Централизованного хранилища отработавшего ядерного топлива АЭС Украины».

Разработанные и практически реализованные Крицким В.Б. в процессе выполнения диссертационной работы методология, вычислительные алгоритмы и программное средство «ДИПРОС» для расчета НДС и динамического поведения оболочечных конструкций представляют практический интерес для проектно-конструкторской и эксплуатационной практики и являются перспективными для применения в инженерной деятельности.

Директор,  
кандидат технических наук



В.Н.Васильченко



**УКРАЇНА**  
**ВАТ ХАРКІВСЬКИЙ НАУКОВО-ДОСЛІДНИЙ**  
**ТА ПРОЕКТНО-КОНСТРУКТОРСЬКИЙ ІНСТИТУТ**  
**"ЕНЕРГОПРОЕКТ"**

20.05.2016г.

**С П Р А В К А**

о внедрении в проектную деятельность ОАО «Харьковский научно-исследовательский и проектно-конструкторский институт «Энергопроект» (ХИЭП) материалов диссертационной работы «Численное моделирование динамики защитных оболочек атомных электростанций при кратковременных нагрузках» (специальность 01.02.04 – механика деформируемого твердого тела)  
 старшего научного сотрудника ГП «Государственный научно-технический центр по ядерной и радиационной безопасности»  
**Крицкого Владимира Борисовича**

Полученные в диссертационной работе Крицкого В.Б. результаты, касающиеся напряженно-деформированного состояния (НДС) и сохранения сплошности (целостности) герметизирующей стальной облицовки защитной оболочки АЭС в условиях максимальной проектной и запроектных аварий (в сочетании с динамическими воздействиями от проектного землетрясения и взрыва воздушно-водородной смеси в реакторном отделении энергоблока АЭС), были использованы специалистами ХИЭП при разработке проектных документов, обосновывающих возможность эксплуатации энергоблока № 1 ОП «Южно-Украинская АЭС» (в т.ч. локализующей системы безопасности – гермоограждения реакторного отделения) в сверхпроектный период.

Результаты диссертационной работы Крицкого В.Б. могут быть рекомендованы к внедрению в инженерную практику, в частности для расчетного анализа НДС и динамического поведения тонкостенных оболочечных конструкций строительных объектов и технологического оборудования энергоблоков АЭС Украины.

Директор технический

С.И.Шапарь

Главный инженер проекта  
ОП «Южно-Украинская АЭС»

Ю.В.Лысых





МІНІСТЕРСТВО ЕНЕРГЕТИКИ ТА ВУГЛЬНОЇ ПРОМИСЛОВОСТІ  
УКРАЇНИ  
**ЕНЕРГО ATOM**

НАЦІОНАЛЬНА АТОМНА  
ЕНЕРГОГЕНЕРУЮЧА КОМПАНІЯ  
Відокремлений підрозділ  
**Южно-Українська АЕС**

№ \_\_\_\_\_ від 24.05.2016 р.

на № \_\_\_\_\_ від 20 р.

Україна, 55000, м. Южноукраїнськ, Миколаївської обл.  
тел.: (044) 227-26-61; (05136) 5-13-32, 4-22-22  
факс: (05136) 4-11-70; 2-18-32  
E-mail: office@zupr.atom.gov.ua

Р/р 26004103087001 в ЗАТ «Альфа-Банк»,  
МФО 300346, ЄДРПОУ 20915546,  
01025, м. Київ

## С П Р А В К А

о внедрении в производственную деятельность ОП «Южно-Украинская АЭС» (ОП ЮУ АЭС) материалов диссертационной работы

**Крицкого Владимира Борисовича**

«Численное моделирование динамики защитных оболочек атомных

электростанций при кратковременных нагрузках»

(специальность 01.02.04 – механика деформируемого твердого тела)

Полученные в диссертационной работе Крицкого В.Б. результаты, касающиеся напряженно-деформированного состояния (НДС) и сохранения сплошности (целостности) герметизирующей стальной облицовки защитной оболочки АЭС в условиях максимальной проектной и запроектных аварий (в сочетании с динамическими воздействиями от проектного землетрясения и взрыва воздушно-водородной смеси в реакторном отделении энергоблока АЭС) были использованы инженерно-техническим персоналом ОП ЮУ АЭС при разработке документации, содержащей обоснование безопасности эксплуатации энергоблоков №№ 1, 2 ОП «Южно-Украинская АЭС» (в т.ч. работоспособности защитных оболочек реакторных отделений) в сверхпроектный период.

Как следствие, есть основание утверждать, что результаты диссертационной работы Крицкого В.Б. представляют практический интерес для проектно-конструкторской, экспертно-аналитической и эксплуатационной практики и являются перспективными для применения в инженерной деятельности.

Главный инженер

Н.А.Феофентов

Начальник ЦСиМР ЭРП

А.В.Кушниров



**ДОДАТОК Б**

**ДОКУМЕНТИ ЩОДО ВПРОВАДЖЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ  
ДИСЕРТАЦІЙНОЇ РОБОТИ В НАУКОВО-ДОСЛІДНИХ  
ОРГАНІЗАЦІЯХ УКРАЇНИ**



**НАЦІОНАЛЬНА АКАДЕМІЯ НАУК УКРАЇНИ  
ІНСТИТУТ ПРОБЛЕМ МІЦНОСТІ імені Г.С.ПИСАРЕНКА  
(ІІМіц імені Г.С.Писаренка НАН України)**

вул. Тимірязєвська, 2, м. Київ-14, 01014, Україна, факс : (044) 286 16 84, тел. 285 16 87  
E-mail: ips@ipp.kiev.ua      Код ЄДРПОУ 05417319

16.05.16 № 56/495-10 На \_\_\_\_\_ від \_\_\_\_\_

В спеціалізовану вчену раду Д 26.166.01  
Інституту механіки ім. С.П. Тимошенка НАН України

03057, м. Київ-57, вул.. Нестерова,3

**Д О ВІДКА**

про впровадження в науково-технічну діяльність  
Інституту проблем міцності імені Г.С. Писаренка  
Національної академії наук України матеріалів дисертаційної роботи

**Крицького Володимира Борисовича**

«Чисельне моделювання динаміки захисних оболонок атомних електростанцій при  
короткочасних навантаженнях»  
(спеціальність 01.02.04 – механіка деформівного твердого тіла)

Отримані в процесі виконання дисертаційної роботи Крицького В.Б. результати щодо напружене-деформованого стану захисної оболонки реакторного відділення енергоблоку АЕС з реакторною установкою ВВЕР-1000/В-302 в аварійних умовах використовувались фахівцями Інституту в якості порівняльної інформації в рамках науково-технічної роботи «Определение напряженно-деформированного состояния и работоспособности защитной оболочки энергоблока № 1 ОП «Южно-Украинская АЭС» в условиях гипотетической тяжелой (запроектной) аварии».

Результати дисертаційної роботи Крицького В.Б. можуть бути рекомендовані до впровадження в інженерну практику, зокрема, для розрахункового аналізу напружене-деформованого стану і динамічної поведінки тонкостінних оболонкових конструкцій будівельних об'єктів і технологічного обладнання енергоблоків АЕС України.

Директор Інституту  
член-кореспондент НАН України



В.В. Харченко

**ІНСТИТУТ МАТЕМАТИКИ  
НАЦІОНАЛЬНОЇ АКАДЕМІЇ  
НАУК УКРАЇНИ**

Терещенківська, 3  
01601 Київ-4, Україна  
Для телеграм: Київ, Математика  
Телефон: (044) 234-51-50  
Факс: (044) 234-20-10  
E-mail: [institute@imath.kiev.ua](mailto:institute@imath.kiev.ua)  
<http://www.imath.kiev.ua>



**INSTITUTE OF MATHEMATICS  
NATIONAL ACADEMY  
of SCIENCES of UKRAINE**

3, Tereshchenkivska Str.  
01601 Kyiv-4, Ukraine  
For telegrams: Kyiv, Mathematics  
Phone: 380 + 44 -234-51-50  
Fax: 380 + 44 -235-20-10  
E-mail: [institute@imath.kiev.ua](mailto:institute@imath.kiev.ua)  
<http://www.imath.kiev.ua>

№ 17 05 2016р.

**Д О В І Д К А**

про впровадження в науково-дослідну діяльність Інституту математики  
Національної академії наук України матеріалів дисертаційної роботи  
**Крицького Владимира Борисовича**  
«Чисельне моделювання динаміки захисних оболонок атомних  
електростанцій при короткочасних навантаженнях»  
(спеціальність 01.02.04 – механіка деформівного твердого тіла)

Отримані в процесі виконання дисертаційної роботи Крицького В.Б. результати щодо напруженео-деформованого стану (НДС) захисної оболонки реакторного відділення енергоблоку АЕС з реакторною установкою ВВЕР-1000/В-302 в аварійних умовах, використовувались фахівцями Інституту математики НАН України в якості вихідної та/або порівняльної інформації в рамках науково-дослідної роботи «Механіко-математичне моделювання і розрахунковий аналіз термомеханічної поведінки, працездатності і локалізуючої здатності захисної оболонки реакторного відділення енергоблоку № 1 ВП «Південно-Українська АЕС» в умовах спільної дії екстремальних природно-технологічних подій – максимального розрахункового землетрусу і максимальної проектної (зaproектної) аварії», яка виконувалась згідно Цільовій програмі наукових досліджень НАН України «Науково-технічний супровід розвитку ядерної енергетики та застосування радіаційних технологій у галузях економіки» відповідно до розпорядження Президії НАН України від 31.05.2011 № 365.

Результати дисертаційної роботи Крицького В.Б. можуть бути рекомендовані до впровадження в інженерну практику, зокрема, для розрахункового аналізу НДС і динамічної поведінки відповідальних конструкцій інженерних будівельних об'єктів і компонентів технологічного обладнання.

Директор Інституту математики  
НАН України, академік  
НАН України



А.М.Самойленко

Завідувач відділом Інституту  
математики НАН України,  
доктор фіз.-мат. наук, професор

М.В.Працьовитий

МІНІСТЕРСТВО РЕГІОНАЛЬНОГО РОЗВИТКУ, БУДІВНИЦТВА ТА ЖИТЛОВО-КОМУНАЛЬНОГО ГОСПОДАРСТВА УКРАЇНИ



**ДЕРЖАВНЕ ПІДПРИЄМСТВО  
„ДЕРЖАВНИЙ НАУКОВО-ДОСЛІДНИЙ ІНСТИТУТ  
БУДІВЕЛЬНИХ КОНСТРУКЦІЙ”  
(ДП НДІБК)**



юридична адреса: вул. І.Клименка, 5/2, м. Київ-37, 03680, поштова адреса: вул. Преображенська, 5/2, м. Київ-37, 03037; тел. (044) 249-72-34, факс (044) 248-89-09  
[www.niisk.com](http://www.niisk.com); e-mail: [niisk-office@ndibk.gov.ua](mailto:niisk-office@ndibk.gov.ua); [adm-inst@ndibk.kiev.ua](mailto:adm-inst@ndibk.kiev.ua); Код ЄДРПОУ 02495431

**С П Р А В К А**

о внедрении материалов диссертационной работы «Численное моделирование динамики защитных оболочек атомных электростанций при кратковременных нагрузках» (специальность 01.02.04 – механика деформируемого твердого тела) старшего научного сотрудника ГП «Государственный научно-технический центр по ядерной и радиационной безопасности» (ГНТЦ ЯРБ)

**Крицкого Владимира Борисовича**

Полученные в диссертационной работе Крицкого В.Б. данные о параметрах расчетной МКЭ-модели, напряженно-деформированном состоянии (НДС) и динамических характеристиках (частотах и формах собственных колебаний) защитной оболочки реакторного отделения энергоблока АЭС в условиях максимальной проектной аварии и проектного землетрясения, использовались в **отделе автоматизации исследований и сейсмостойкости зданий и сооружений ГП НИИСК** в течение 2014-2015 гг. (по согласованию с ГНТЦ ЯРБ) при выполнении научно-технической работы: «Разработка расчетной модели защитной оболочки энергоблока АЭС с ВВЭР-1000 типа В-302 для определения минимально допустимых усилий натяжения армоканатов СПЗО и оценки прочности и надежности СГО ЛСБ в условиях сочетания проектной аварии и проектного землетрясения».

Первый заместитель  
директора по научной  
работе, д.т.н., профессор

Ю.И. Немчинов



## ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

- 1 Доповідь про стан ядерної та радіаційної безпеки в Україні у 2015 році. – К.: Держатомрегулювання України, 1915. – 93 с.
- 2 Отчет о научно-исследовательской работе «Исследование напряженно-деформированного состояния преднапряженной железобетонной защитной оболочки АЭС при нестационарных термосиловых воздействиях. Расчет защитной оболочки АЭС методом конечных элементов» (Заключительный). – К.: КИСИ – ПНИЛТПК, 1988. – 57 с.
- 3 Белохин С.Л., Лазарев И.В., Халютина В.Н., Вовкушевский А.В., Петров В.А., Судакова В.Н. Напряженно-деформированное состояние железобетонных защитных оболочек АЭС с предварительным напряжением арматурных пучков // Энергетическое строительство. – 1993, № 8. – сс. 65–68.
- 4 Нефедов С.С., Тураев Ю.Н., Бедняков В.Г., Швец Н.С. Расчет сейсмических повреждений защитной оболочки АЭС // Энергетическое строительство. – 1993, № 9. – сс. 69–71.
- 5 Киселев А.С., Киселев А.С., Кошманов Е.А., Медведев В.Н., Ульянов А.Н. Повышение эксплуатационных качеств защитных оболочек АЭС. – М.: Институт проблем безопасного развития атомной энергетики, Препринт № NSI-22-SM, 1994. – 19 с.
- 6 Отчет о работе на тему «Расчет трещинообразования защитной оболочки от давления 4.6 ати в местах отсутствия армоканатов». – К.: НПП «Топаз-Информ», 1995. – 53 с.
- 7 Хмельницкая АЭС. Энергоблок №2. Расчетное обоснование напряженно-деформированного состояния ЗО в ослабленных проемами и проходками зонах при натяжении армоканатов СПЗО на величину 720 тс. Этап 1. Отчет. 43-250.211.001.РК00. – К.: Киевский научно-исследовательский и проектно-конструкторский институт «Энергопроект» (КИЭП), 22.12.03. – 19 с.
- 8 Расчёт несущей способности гермообъёма блока № 1 ЮУ АЭС под воздействием нагрузки, вызываемой тяжелыми авариями, в рамках ВАБ уровня 2. Финальный отчёт. – ВП «Южно-Українська АЕС», 2009. – 88 с. (Calculations on the Load Carrying Capacity of the SUNPP-1 Containment due to Severe Accident Loading

in the Framework of the PRA Level 2. Final report. GRS-V-332100-1/2009. – Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH, \_\_\_.04.09. – 89 с.).

9 Расчетное обоснование надежности защитной оболочки энергоблока № 1 ВП ЮУАЭС с учетом уроков аварии на АЭС «Фукусима-Даichi» (сочетание проектной аварии и землетрясения). Книги 1. 01.АЛ.ЮУ.ОТ.297.01. – ООО «АЦ «Альгиз», 2014. – 228 с.

10 Отчет «Определение минимально допустимых усилий натяжения АК ЗО энергоблока № 1 ОП ЮУАЭС с учетом нагружений от МПА и ПЗ». ОЧ-00.546-01.01. – Днепропетровск: ГВУЗ «Приднепровская государственная академия строительства и архитектуры», 2013. – 136 с.

11 Сахаров А.С., Гондлях А.В., Стрижало А.В., Рябчук А.Н., Богуцкий О.А. Оценка несущей способности защитных оболочек АЭС при динамическом ударном нагружении // «Сопротивление материалов и теория сооружений», Вып. 63. – К.: КДТУБА, 1997. – сс. 115-123.

12 Болотин В.В. Динамическая устойчивость упругих систем. – М.: Гостехиздат, 1956. – 600 с.

13 Гуляев В.И., Баженов В.А., Гоцуляк Е.А., Дехтярюк Е.С., Лизунов П.П. Устойчивость периодических процессов в нелинейных механических системах. – Львов: Вища школа. Изд-во при Львов. ун-те, 1983. – 288 с.

14 Вольмир А.С., Куранов Б.А., Турбаивский А.Т. Статика и динамика сложных структур: Многоуровневые методы исследований. – М.: Машиностроение, 1989. – 248 с.

15 Галиев Ш.У. Динамика взаимодействия элементов конструкций с волной давления в жидкости. – К.: Наукова думка, 1977. – 172 с.

16 Галиев Ш.У., Каршиев А.Б. Особенности неожиданного поведения плоских и искривленных пластин после снятия импульсной нагрузки // Проблемы прочности. – 1990. – № 5, сс. 95-98.

17 Галиев Ш.У., Каршиев А.Б., Абдирашилов А. Особенности деформирования сферической панели при импульсном нагружении // Проблемы прочности. – 1989, № 3, сс. 91-94.

18 Галиев Ш.У., Нечитайло Н.В. Динамика формоизменения тонких

пластин в оболочки вращения // АН УССР. Институт проблем прочности. – Препр. – Киев, 1985 – 48 с.

19 Галиев Ш.У., Нечитайло Н.В. Неожиданное поведение пластин при импульсном и гидродинамическом нагружении // Проблемы прочности, 1986, № 12, сс. 63-72.

20 Клаф Р., Пензиен Дж. Динамика сооружений. Пер. с англ. – М.: Стройиздат, 1979. – 320 с.

21 Новацкий В. Динамика сооружений / Пер. с польского. М.: Стройиздат, 1963. – 376 с.

22 Власов О.Е. Расчет балки на импульс // Вестник ВИА, 1940, № 30.

23 Гузь А.Н., Немиш Ю.Н. Методы возмущений в пространственных задачах теории упругости. – К.: «Вища школа», 1982. – 352 с.

24 Григоренко Н.И., Мокеев В.В. О задачах исследования колебаний конструкций методом конечных элементов // В кн. «Прикладная механика» – 1985, т. 21, № 3, сс. 25-30.

25 Баженов В.А., Гоцуляк Е.А., Гуляев В.И., Дехтярюк Е.С. Устойчивость периодических процессов в нелинейных механических системах // В кн. «Динамика пространственных конструкций». – К.: 1978, сс. 61-64.

26 Болотин В.В. Применение статистических методов для оценки прочности конструкций при сейсмических воздействиях // Инженерный сборник АН СССР, 1959, т. 27, сс. 21-30.

27 Болотин В.В. Случайные колебания упругих систем. – М.: Наука, 1979. – 336 с.

28 Болотин В.В. Статистическая теория сейсмостойкости сооружений // Изв. АН СССР. Сер. Механика и машиностроение, 1959, № 4, сс. 15-24.

29 Дехтярюк Е.С. Численное исследование нелинейных колебаний пластины в поле случайных давлений // Сопротивление материалов и теория сооружений. – Киев: Будівельник, 1986, Вып. 49, сс. 8-10.

30 Исаханов Г.В., Дехтярюк Е.С., Лумельский Е.Д. и др. Устойчивость оболочек при случайном параметрическом воздействии // Сопротивление материалов и теория сооружений. – Киев: Будівельник, 1983, Вып. 42, с. 3-11.

- 31 Исаханов Г.В., Лумельский Е.Д., Мельник-Мельников П.Г., Кацапчук А.Н. Анализ нелинейной динамической реакции тонкостенных пространственных конструкций при нестационарном случайному воздействии методом Монте-Карло // Сопротивление материалов и теория сооружений. – Киев: Будівельник, 1989, Вып. 55, сс. 3-6.
- 32 Вольмир А.С. Нелинейная динамика пластиноок и оболочек. – М.: «Наука», 1972. – 432 с.
- 33 Ворович И.И. Некоторые вопросы устойчивости оболочек в большом // В кн. «Докл. АН СССР» – 1958, т. 122, № 1, сс. 37-40.
- 34 Гольденвейзер А.Л. Теория упругих тонких оболочек. М.: Гостехиздат, 1953. – 544 с.
- 35 Григолюк Э.И., Горшков А.Г. Взаимодействие слабых ударных волн с упругими конструкциями // В кн. «Научные труды института механики МГУ» – 1970, № 2.
- 36 Григолюк Э.И. Нелинейные колебания и устойчивость пологих стержней и оболочек // В кн. «Изв. АН СССР. Механика и машиностроение». – 1955, № 3, сс. 52-68.
- 37 Лурье А.И. Удар по пластинке // В кн. «Прикладная математика и механика». – 1934, т. 2, № 1.
- 38 Исаханов Г.В., Мельник-Мельников П.Г., Кацапчук А.Н. Исследование нестационарных случайных колебаний цилиндрической панели в геометрически нелинейной постановке // Сопротивление материалов и теория сооружений. – Киев: Будівельник, 1990, Вып. 57, сс. 104-108.
- 39 Исаханов Г.В., Мельник-Мельников П.Г., Кацапчук А.Н. Численная методика исследования нестационарных случайных колебаний пластин и оболочек // Сопротивление материалов и теория сооружений. – Киев: Будівельник, 1992, Вып. 60, сс. 91-99.
- 40 Исаханов Г.В., Мельник-Мельников П.Г., Чирва В.Н. Исследование напряженно-деформированного состояния пластин при случайной стационарной нагрузке // Сопротивление материалов и теория сооружений. – Киев: Будівельник, 1985, Вып. 47, сс. 3-5.

- 41 Исаханов Г.В., Мельник-Мельников П.Г., Чирва В.Н. Численное исследование колебаний конструкций, подверженных воздействию случайных полей // Сопротивление материалов и теория сооружений. – Киев: Будівельник, 1986, Вып. 48, сс. 3-6.
- 42 Амиро И.Я., Заруцкий В.А., Паламарчук В.Г. Динамика ребристых оболочек. – К.: «Наукова думка», 1983. – 204 с.
- 43 Головко К.Г. Динамика неоднородных оболочек при нестационарных нагрузках / К.Г.Головко, П.З.Луговой, В.Ф.Мейш. – К: Издательско-полиграфический центр «Киевский университет», 2012. – 541 с.
- 44 Луговой П.З., Мейш В.Ф., Штанцель Э.А. Нестационарная динамика неоднородных оболочечных конструкций. – К.: Изд. Полигр. центр «Киевский ун-т», 2005. – с. 536.
- 45 Аугусти Г. Вероятностные методы в строительном проектировании / Аугусти Г., Баратта А., Кашиати Ф.; пер. с англ. Ю.Д. Сухова. – М.: Стройиздат, 1988. – 584 с.
- 46 Деклу Ж. Метод конечных элементов. Пер. с англ. – М.: Мир, 1976. – 95 с.
- 47 Галлагер Р. Метод конечных элементов. Основы. – М.: Мир, 1984. – 428 с.
- 48 Исаханов Г.В., Кислоокий В.Н., Сахаров А.С., Синявский А.Л. Прочность-75. Система математического обеспечения расчетов пространственных конструкций. Общее описание системы. – Киев: ИК АН УССР, 1975, т. 1. – 332 с.
- 49 Аттестационный паспорт программного средства от 02.11.2000 № 124 ... Проектно-вычислительный комплекс Structure CAD (ПВК SCAD) ... Аттестовать бессрочно. – М.: Федеральный надзор России по ядерной и радиационной безопасности. Научно технический центр по ядерной и радиационной безопасности, 2000. – 5 с.
- 50 Аттестационный паспорт программного средства от 31.10.2002 № 145 ... Программа ANSYS 5.2-5.7 ... Аттестовать бессрочно. – М.: Федеральный надзор России по ядерной и радиационной безопасности. Научно-технический центр по ядерной и радиационной безопасности, 2002. – 6 с.
- 51 Аттестационный паспорт программного средства от 26.05.05 № 193 ... Программный комплекс ЛИРА ... Аттестовать на срок 10 лет. – М.: Федеральный

надзор России по ядерной и радиационной безопасности. Научно технический центр по ядерной и радиационной безопасности, 2005. – 4 с.

52 Пискунов В.Г., Зверева Т.А. Численное моделирование динамического поведения слоистых пологих оболочек при кратковременных нагрузках // Сопротивление материалов и теория сооружений. – Киев: Будівельник, 1991, Вып. 59, сс. 14-18.

53 Самарский А.А. Теория разностных схем. – М.: Наука, 1977.

54 Самарский А.А., Гулин А.В. Устойчивость разностных схем. – М.: Наука, 1973.

55 Баженов В.А., Гоцуляк Е.А., Кондаков Г.С. Исследование колебаний пластин и оболочек на основе метода криволинейных сеток и редукции базиса // Сопротивление материалов и теория сооружений. - Киев: Будівельник, 1986, вып. 49, с. 6-8.

56 Баженов В.А., Дехтярюк Е.С., Захарченко Т.Г. Регулярные и нерегулярные режимы установившихся колебаний подкрепленной пластины // Сопротивление материалов и теория сооружений. - Киев: Будівельник, 1992, вып. 60, с. 3-8.

57 Баженов В.А., Заблоцкий С.В. Нелинейный анализ устойчивости цилиндрических и конических панелей на основе метода редукции базиса // Сопротивление материалов и теория сооружений. – Киев: Будівельник, 1985, вып. 47, с. 5-13.

58 Гоцуляк Е.А. Выбор базиса в методе редукции при решении нелинейных задач устойчивости оболочек // Сопротивление материалов и теория сооружений. – Киев: Будівельник, 1985, Вып. 47, сс. 16-21.

59 Гоцуляк Е.А., Ермишев В.Н. Нелинейный анализ устойчивости оболочек на основе трансформации собственных векторов и значений линеаризованного оператора // Сопротивление материалов и теория сооружений. – Киев: Будівельник, 1989, Вып. 54, сс. 20-24.

60 Гоцуляк Е.А., Ермишев В.Н., Заблоцкий С.В. Применение метода редукции базиса к решению линейных задач устойчивости оболочек // Прикладные проблемы прочности и пластичности: Алгоритмизация и автоматизация решения

- задач упругости и пластичности. – Горький: Изд-во Горьк. ун-та, 1985, сс. 51-58.
- 61 Гоцуляк Е.А., Заблоцкий С.В. Применение метода редукции базиса к исследованию устойчивости оболочек // Сопротивление материалов и теория сооружений. – Киев: Будівельник, 1985, Вып. 46, сс. 37-43.
- 62 Гоцуляк Е.А., Заблоцкий С.В. Применение метода редукции базиса к исследованию устойчивости оболочек с начальными прогибами // Сопротивление материалов и теория сооружений. – Киев: Будівельник, 1986, Вып. 48, сс. 21-24.
- 63 Гоцуляк Е.А., Заблоцкий С.В., Чеверда П.П. Устойчивость торOIDальной оболочки эллиптического сечения при динамическом нагружении // Сопротивление материалов и теория сооружений. – Киев: Будівельник, 1991, вып. 59, сс. 53-60.
- 64 Гоцуляк Е.А., Киричук А.А. Метод редукции базиса в задаче о динамическом прощелкивании упругих оболочек // Прикладные проблемы прочности и пластичности. Алгоритмизация и автоматизация исследований. – Горький: Изд-во Горьк. ун-та, 1987, сс. 117-123.
- 65 Гоцуляк Е.А., Киричук А.А. Об устойчивости переходных процессов в оболочках сложной формы // Прикладная механика, 1988, т. 24, № 6, сс. 48-55.
- 66 Дехтярюк Е.С. Устойчивость вынужденных осесимметричных колебаний оболочек вращения // Сопротивление материалов и теория сооружений. – Киев: Будівельник, 1989, вып. 55, сс. 104-108.
- 67 Дехтярюк Е.С. Устойчивость вынужденных поперечных нелинейных колебаний пластин в окрестности плоской и криволинейной форм равновесия при закритических усилиях поперечного сжатия // Сопротивление материалов и теория сооружений. – Киев: Будівельник, 1987, Вып. 51, сс. 19-24.
- 68 Дехтярюк Е.С. Устойчивость квазипериодических режимов колебаний пластин и оболочек при периодическом воздействии // Сопротивление материалов и теория сооружений. – Киев: Будівельник, 1989, Вып. 54, сс. 3-7.
- 69 Дехтярюк Е.С. Численное исследование субгармонической бифуркации режимов вынужденных нелинейных колебаний оболочек // Сопротивление материалов и теория сооружений. – Киев: Будівельник, 1988, Вып. 53, сс. 11-15.
- 70 Дехтярюк Е.С., Ковтунов В.Б. Численное исследование периодических режимов параметрических колебаний цилиндрической панели // Сопротивление

- материалов и теория сооружений. – Киев: Будівельник, 1988, Вип. 52, сс. 15-19.
- 71 Дехтярюк Е.С., Ковтунов В.Б., Лумельский Е.Д. Построение областей динамической неустойчивости пластин и оболочек // Прикладная механика, 1987, т. 23, № 5, сс. 46-52.
- 72 Дехтярюк Е.С., Лумельский Е.Д. Численное построение нелинейных динамических моделей пологих оболочек и пластин // Сопротивление материалов и теория сооружений. – Киев: Будівельник, 1984, Вип. 45, сс. 5-9.
- 73 Дехтярюк Е.С., Лумельский Е.Д., Смирнов И.Г. Устойчивость стационарных динамических состояний гибких пластин и оболочек при гармоническом воздействии // Сопротивление материалов и теория сооружений. – Киев: Будівельник, 1986, Вип. 48, сс. 6-8.
- 74 Исаханов Г.В., Дехтярюк Е.С., Ковтунов В.Б., Лумельский Е.Д. Устойчивость и бифуркации стационарных режимов при нелинейных колебаниях пластин и оболочек // Проблемы прочности, 1989, № 12, сс. 97-102.
- 75 Исаханов Г.В., Дехтярюк Е.С., Крицкий А.Б. Численное исследование бифуркации в задачах устойчивости тонкостенных конструкций // Проблемы прочности, 1992, № 2.
- 76 Исаханов Г.В., Дехтярюк Е.С., Лумельский Е.Д. Устойчивость вынужденных колебаний защемленной цилиндрической панели // Сопротивление мате и теория сооружений. – Киев: Будівельник, 1987, Вип. 50, сс. 7-11.
- 77 Исаханов Г.В., Дехтярюк Е.С., Лумельский Е.Д. Численное исследование устойчивости вынужденных нелинейных колебаний пологой цилиндрической оболочки // Проблемы прочности, 1989, № 4, сс. 74-78.
- 78 Касилова Т.А., Крицкий В.Б., Кислоокий В.Н. и др. Решение нелинейных задач статики и динамики комбинированных конструкций на основе методов декомпозиции и редуцированных схем МКЭ // III конференция "Совершенствование эксплуатации и ремонта корпусов судов: Тез. докл. Калининград. технич. институт. – Калининград: ЦНТИ, 1984, сс. 57-59.
- 79 Касилова Т.А., Крицкий В.Б., Легостаев А.Д., Седлецкая Н.И. Анализ прочности и динамики нелинейных комбинированных конструкций МКЭ // Проблемы снижения материалоемкости силовых конструкций. Тезисы докладов

Всесоюзной конференции. – Горький: Изд. ГГУ, 1984, сс. 48-49.

80 Кислоокий В.Н., Гранат С.Я. Исследование колебаний пластин, оболочек и комбинированных систем методом базисных векторов на основе разностной дискретизации // Сопротивление материалов и теория сооружений. – Киев: Будівельник, 1972, Вып. 16, сс. 28-32.

81 Кислоокий В.Н., Ковальчук Н.В., Легостаев А.Д., Соловей Н.А. Исследование устойчивости ребристых слабоконических оболочек с большими отверстиями в геометрически нелинейной постановке // Прикладная механика, 1984, т. 20, № 11, сс. 55-61.

82 Кислоокий В.Н., Крицкий В.Б., Легостаев А.Д. Применение МКЭ к решению нелинейных задач динамики комбинированных конструкций // Тезисы докладов V Всесоюзной конференции по статике и динамике пространственных конструкций. – Киев: КИСИ, 1985.

83 Кислоокий В.Н., Легостаев А.Д. Определение частот и форм собственных колебаний гидронасосов и гидротурбин методом конечных элементов // Динамика и прочность машин. – Харьков: Вища школа, 1976, Вып. 23, сс. 110-117.

84 Кислоокий В.Н., Легостаев А.Д. Реализация метода конечных элементов в задачах исследования свободных колебаний оболочек и пластин // Сопротивление материалов и теория сооружений. - Киев: Будівельник, 1974, – Вып. 24, сс. 25-32.

85 Кислоокий В.Н., Легостаев А.Д., Демьянюк Р.К., Крицкий В.Б., Касилова Т.А. Методические рекомендации по применению метода конечных элементов и программ расчета на ЭВМ пластинчато-оболочечных конструкций в области низших форм колебаний. – Киев: КИСИ, 1986. – 115 с.

86 Кислоокий В.Н., Легостаев А.Д., Крицкий В.Б., Соловей Н.А. Применение редуцированных конечноэлементных моделей для решения задач динамики и устойчивости оболочек в линейной и нелинейной постановках // Республикаанская конференция по повышению надежности и долговечности машин и сооружений: Тез. докл. – Киев: Наук думка, 1982, ч. 1. – сс. 101-102.

87 Матченко Т.І., Матченко П.Т., Шаміс Л.Б. Первушова Л.Ф. Розвиток та удосконалення методологічної бази з визначення залишкового ресурсу

залізобетонних конструкцій АЕС (Огляд) // Проблеми безпеки атомних електростанцій і Чорнобиля. Вип. 16. – Чорнобиль, 2011. – сс. 37-44.

88 Матченко Т.І., Шаміс Л.Б., Первушова Л.Ф. Оцінка експлуатаційної надійності залізобетонних конструкцій АЕС, що знаходяться в експлуатації // Проблеми безпеки атомних електростанцій і Чорнобиля. Вип. 17. – Чорнобиль, 2011, сс. 40-52.

89 Гайдайчук В.В., Носенко В.П., Худолій С.М. Механіка конструкцій вітроенергетичних установок. – Київ: Видавництво Аграр Медіа Груп, 2013. – 263 с.

90 Гуляєв В.І., Гайдайчук В.В., Носенко В.П. Скінченноелементний аналіз стійкості коливань лопатей ВЕУ при складному обертанні // В кн. «Промислове будівництво та інженерні споруди». – № 1, 2013. – сс. 8-13.

91 Клайн К.А. Исследование динамического поведения конструкций с помощью усеченного базиса из собственных форм и векторов Ритца // Аэрокосмическая техника, 1987, № 6, сс. 168-177.

92 Крицкий А.Б., Крицкий В.Б. Анализ различных подходов при выборе базиса в геометрически нелинейных задачах статики и динамики оболочечных конструкций // Киев. инж.-строит. ин-т. – Киев, 1993. – 32 с. Деп. в ГНТБ Украины 20.12.93 № 2461-Ук93.

93 Крицкий А.Б., Крицкий В.Б. Эффективная схема построения редуцированных нелинейных уравнений для оболочек на основе МСКЭ // Сопротивление материалов и теория сооружений. – Киев: Будівельник, 1994, Вип. 62, сс. 68-77.

94 Крицкий А.Б., Крицкий В.Б., Попов В.В. К вопросу учета связей, ориентированных произвольным образом, при расчете оболочечных конструкций на основе МКЭ // Киев. гос. тех. унив-тет строит. и архит-ры. – Киев, 1994. – 11 с. Деп. в ГНТБ Украины 16.03.94 № 576-Ук94.

95 Крицкий В.Б. Комплекс программ «ДИПРОС – ЕС/СМ/ПЭВМ» (Динамика и прочность оболочечных систем). Описание применения (сокращенный вариант) / Киевский инж.-строит. ин-т. – Киев, 1990. – 70 с. Деп. в УкрНИИНТИ 26.07.90 № 1222-Ук90.

- 96 Крицкий В.Б. Методика конечноэлементного расчета комбинированных конструкций и реализация ее в пакете прикладных программ «ПРОЧНОСТЬ-75» // Автоматизация проектных работ в сельском строительстве. Тез. докл. обл. научно-практич. конференции. – Ростов-на-Дону, 1985, сс. 40-42.
- 97 Нур А.К., Андерсен К.М., Петерс Дж.М. Метод приведенного базиса в задачах об устойчивости оболочек // Ракетная техника и космонавтика, 1981, № , сс. 129-135.
- 98 Нур А.К., Петерс Дж.М. Метод приведения базиса для нелинейного анализа конструкций // Ракетная техника и космонавтика, 1980, т. 18, № 5, сс. 131-140.
- 99 Элмрот Б.О., Штерн П., Броуген Ф.А. Автоматический выбор глобальных функций формы в расчете конструкций // Ракетная техника и космонавтика, 1978, т. 16, № 5, сс. 137-142.
- 100 Сорокин Е.С. О погрешностях общеизвестного метода теории колебаний диссипативных систем в применении к неоднородному демпфированию // Строительная механика и расчет сооружений, 1984, № 2, сс. 29-34.
- 101 Баженов В.А., Заблоцкий С.В. Нелинейный анализ устойчивости цилиндрических и конических панелей на основе метода редукции базиса // Сопротивление материалов и теория сооружений. – Киев: Будівельник, 1985, вып. 47, сс. 5-13.
- 102 Вайнберг М.М., Треногин В.А. Теория ветвления решений нелинейных уравнений. – М.: Наука, 1969. – 527 с.
- 103 Вольмир А.С. Устойчивость деформируемых систем. – М.: Наука, 1967. – 984 с.
- 104 Постнов В.А. Численные методы расчета судовых конструкций. – Л.: Судостроение, 1977. – 279 с.
- 105 Постнов В.А., Хархурим И.Я. Метод конечных элементов в расчетах судовых конструкций. – Л.: Судостроение, 1974. – 342 с.
- 106 Ганиев Р.Ф., Ковальчук П.С. Динамика систем твердых и упругих тел. – М.: Машиностроение, 1980. – 208 с.
- 107 Канторович Л.В. Функциональный анализ и прикладная математика // В

кн. «Успехи мат. наук» – 1948, т. 3, № 6(28), сс. 89-185.

108 Канторович Л.В., Крылов В.И. Приближенные методы высшего анализа. 5-е изд. – М.-Л.: Физматгиз, 1962. – 708 с.

109 Крицкий В.Б., Карнаухов А.А. Подходы к прогнозированию уровня преднатяжения армоканатов СПЗО и Информационно-экспертная система по накоплению и документированию данных об арматурных канатах СПЗО энергоблоков ВВЭР-1000 АЭС и оценке состояния системы преднатяжения // Ядерная и радиационная безопасность. – Киев: ГНТЦ ЯРБ, том 2, вып. 2, 1999. – сс. 88-99.

110 Крицкий А.Б., Крицкий В.Б., Карнаухов А.А., Трубчанинов О.А. Моделирование динамического поведения элементов конструкций АЭС на основе применения смешанного базиса редукции из собственных форм колебаний и векторов Ланцоша // «Ядерная и радиационная безопасность». – К.: ГНТЦ ЯРБ, № 1, 2000. – сс. 62-68.

111 Рыжов Д.И., Майборода Е.Е., Крицкий В.Б., Шугайло А.П. Сравнительный анализ нормативных документов по сейсмическому проектированию АЭС, действующих в Украине и России // Ядерная и радиационная безопасность. – Киев: ГНТЦ ЯРБ, №4, 2002, сс. 47-53.

112 Кондратьев С.Н., Крицкий В.Б., Прабхакара М., Рыжов Д.И., Шугайло А.П., Шугайло А-р.П. Оценка эффективности антисейсмических мероприятий в проекте стабилизации объекта «Укрытие» Чернобыльской АЭС // Ядерная и радиационная безопасность. – Киев: ГНТЦ ЯРБ, № 1, 2004. – сс. 96-100.

113 Крицкий В.Б., Майборода Е.Е., Рыжов Д.И., Шугайло А-р.П., Шугайло А.П. Проблемные вопросы в нормативной базе Украины по обеспечению сейсмостойкости строительных конструкций, систем и элементов ядерных установок // Ядерная и радиационная безопасность. – Киев: ГНТЦ ЯРБ, Том. 9, Випуск 2, № 3, 2006. – сс. 34-40.

114 Шугайло А.П., Шугайло А-р.П., Рыжов Д.И., Крицкий В.Б., Романов С.В., Колупаев А.М. Рекомендации по совершенствованию национальной нормативной базы в части продления срока эксплуатации и управления старением энергоблоков АЭС Украины // Ядерная и радиационная безопасность. – Киев:

ГНТЦ ЯРБ, № 3, 2013. – сс. 3-9.

115 Крицкий В.Б., Крицкий А.Б., С.А.Мудрагель Численное моделирование динамического поведения защитной оболочки реакторного отделения АЭС // Прогрессивная техника и технология машиностроения, приборостроения и сварочного производства. – Киев: НТТУ «КПИ», 1998, – сс. 165-168.

116 Алекс Х., Кондратьев С.Н., Крицкий В.Б., Рыжов Д.И., Шугайло А.П., Прабхакара М. Оценка применения норм по обеспечению сейсмостойкости проекта большепролетного арочного сооружения (НБК) над объектом «Укрытие» ЧАЭС // Міжвідомчий науково-технічний збірник наукових праць «Будівельні конструкції», – К.: НІІСК, Випуск № 62, т. 2, 2005. – сс. 89-95.

117 Крицкий В.Б., Майборода Е.Е., Рыжов Д.И., Шугайло А-р.П., Шугайло А.П. Анализ современного состояния нормативной базы Украины по обеспечению сейсмостойкости строительных конструкций и оборудования ядерных установок // Міжвідомчий науково-технічний збірник наукових праць «Будівельні конструкції», Випуск № 64. – 2006. – сс. 140-146.

118 Майборода Е.Е., Рыжов Д.И., Крицкий В.Б., Леткова Н.Г., Шугайло Ар.П., Шугайло А.П. О необходимости проведения исследований сейсмической опасности площадок АЭС Украины с использованием современных международных требований и подходов // Зб. наук. праць СНУЯЕтаП. – 2007, № 3, (23) – сс. 155-164.

119 Крицкий В.Б, Марьенков Н.Г, Бабик КН., Недзведская О.Г. Нелинейная сейсмическая реакция защитной оболочки энергоблока АЭС после проектной аварии // Міжвідомчий науково-технічний збірник наукових праць «Будівельні конструкції». – 2015, – № 82. сс. 619-636.

120 Крицкий В.Б., Майборода Е.Е., Улановский М.Г. О результатах сопоставительных расчетов защитной оболочки реакторного отделения ВВЭР-1000/B-320 // The Analysis of Prestress Loss in Tendons of the WWER-1000 Containments. International Conference Proceedings. GRS, Berlin, Germany, 12-19.12.1998. - Berlin, Germany: GRS, 1999. – сс. 141-158.

121 В.Б.Крицкий. Применение смешанного базиса редукции на основе векторов Ланцюша и собственных форм для экспресс-анализа работоспособности

захисних оболочок АЕС // Матеріали Міжнародної наукової конференції «Математичні проблеми технічної механіки – 2007». – Дніпродзержинськ, 2007. – с. 130.

122 НП 306.2.141-2008. Загальні положення забезпечення безпеки атомних станцій. – К.: Державний комітет ядерного регулювання України, 2008. – 58 с.

123 СНиП 2.03.01-84\*. Бетонные и железобетонные конструкции. – Втратив чинність (див. [125]).

124 Фиделев А.С., Чубук Ю.Ф. Строительные машины. – К.: «Вища школа», 1971. – 356 с.

125 ДБН В.2.6-98:2009. Конструкції будинків і споруд. Бетонні та залізобетонні конструкції. Основні положення. – Чинний з 01.06.11, на заміну «СНиП 2.03.01-84\*. Бетонные и железобетонные конструкции» [123].

126 СНиП II-23-81\*. Стальные конструкции. – Втратив чинність (див. [127]).

127 ДБН В.2.6-163:2010. Конструкції будинків і споруд. Сталеві конструкції. Норми проектування, виготовлення і монтажу. – чинний з 01.09.11, на заміну «СНиП II-23-81\*. Стальные конструкции» [126] (окрім розділів 15\*-19), «СНиП III-18-75. Металлические конструкции» (окрім розділів 3-8), «СНиП 3.03.01-87. Несущие и ограждающие конструкции» (в частині, що стосується монтажу сталевих конструкцій, окрім пп. 4.78-4.134).

128 Лист «Всесоюзного государственного научно-исследовательского, проектно-конструкторского и изыскательского института «Атомэнергопроект» до ДНТЦ ЯРБ від 23.05.95 № 21043/19-34. – 1 с.

129 ПиН АЭ-5.6. Нормы строительного проектирования АС с реакторами различного типа. – М.: Минатомэнерго СССР, 29.12.86. – 21 с.

130 ПНАЭ Г-5-006-87. Нормы проектирования сейсмостойких атомных станций. – М.: Госатомэнергонадзор СССР, 1988. – 29 с.

131 ПНАЭ Г-10-007-89. Нормы проектирования железобетонных сооружений локализующих систем безопасности атомных станций. – М.: Госпроматомнадзор СССР, 1991. – 40 с.

132 ДБН В.1.1-12:2014. Будівництво в сейсмічних районах України. – К.: Мінрегіонбуд України, 2014. – 110 с.

- 133 (26а) Бирбраер А.Н., Шульман С.Г. Прочность и надежность конструкций АЭС при особых динамических воздействиях. – М.: «Энергоатомиздат», 1989. – 304 с.
- 134 Бирбраер А.Н. Экстремальные воздействия на сооружения / А.Н.Бирбраер, А.Ю.Роледер. – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2009. – 594 с.
- 135 Кильчевский Н.А. Основы аналитической механики оболочек. – К.: Изд. АН УССР, 1963. – 354 с.
- 136 Блох В.И. Теория упругости. - Харьков: Изд-во Харьковского гос. ун-та, 1964. – 483 с.
- 137 Седов Л.И. Механика сплошной среды. Т. 1. – М.: «Наука», 1970. – 492 с.
- 138 Кислоокий В.Н., Сахаров А.С., Соловей Н.А. Моментная схема метода конечных элементов в геометрически нелинейных задачах прочности и устойчивости оболочек // Проблемы прочности. – К., 1977, № 7. – сс. 25-32.
- 139 Сахаров А.С. Модификация метода Ритца для расчета массивных тел на основе полиномиальных разложений с учетом жестких смещений // В сб. «Сопротивление материалов и теория сооружений», вып. XXIII. – К.: «Будівельник», 1974, сс. 61-70.
- 140 Сахаров А.С. Моментная схема конечных элементов (МСКЭ) с учетом жестких смещений // В сб. «Сопротивление материалов и теория сооружений», вып. XXIV. – К.: «Будівельник», 1974, сс. 147-156.
- 141 Сахаров А.С. Моментная теория метода конечного элемента // Труды VII Международного конгресса по применению математики в технических науках. Научный журнал Высшей школы архитектуры и строительства. – Веймар, вып. 22, № 2, 1975, сс. 218-227.
- 142 Гольденвейзер А.Л. Теория упругих тонких оболочек. М.: Гостехиздат, 1953. – 544 с.
- 143 Новожилов В.В. Теория тонких оболочек. Л.: Судпромгиз, 1962. – 431 с.
- 144 Андерсон, Линберг. Динамическое выпучивание цилиндрических оболочек под действием нестационарного бокового давления при динамических нагрузках // Ракетная техника и космонавтика. – 1968, т. 4, № 6.
- 145 Отчет о результатах работы по теме: «Получение расчетных обоснований

поэтажных спектров ответа и максимальных ускорений от сейсмических воздействий для отметок установленного оборудования первой очереди, которое подлежит квалификации». 01.00-22.1965-01. Объекты первой очереди ЮУ АЭС. Расчетное обоснование поэтажных спектров ответа при квалификации оборудования на сейсмическое воздействие 0,12g. – ОП «Южно-Украинская АЭС» (Днепропетровск: ООО «Фундаментстроймакс»), 2011, пог. листом Держатомрегулювання України від 17.05.12 № 15-31/3-1/3064. – 234 с.

146 Бирбраер А.Н. Расчет конструкций на сейсмостойкость / А. Н. Бирбраер. — СПб. : Наука, 1998. – 255 с.

147 Пискунов Н.С. Дифференциальное и интегральное исчисление. Том 2. Учебное пособие для вузов. – М.: Наука, 1985. – 560 с.

148 Сахаров А.С. Моментная схема конечных элементов (МСКЭ) с учетом жестких смещений // В кн. «Сопротивление материалов и теория сооружений». – Киев: «Будівельник», 1974, Вып. 24, сс. 147-156.

149 Метод конечных элементов в механике твердых тел / Под общ. ред. А.С.Сахарова и И.Альтенбаха. – Киев: «Вища школа», Лейпциг: ФЕВ Фахбухферлаг, 1982. – 480 с.

150 Кислоокий В.Н., Легостаев А.Д., Сахаров А.С., Соловей Н.А., Ильченко Е.Н., Крицкий В.Б. Прочность-75. Система математического обеспечения расчетов пространственных конструкций (в 3-х частях). Часть 3. Раздел ДИСТОС. Статика и динамика оболочечных систем. Том 1, 2, 3. – Киев: Институт кибернетики, рукопись депонирована в РГАП АН УССР, № 5759, 1981. – 190 с.

151 Кислоокий В.Н., Сахаров А.С., Соловей Н.А. Моментная схема метода конечных элементов в геометрически нелинейных задачах прочности и устойчивости оболочек // В кн. «Проблемы прочности», 1977, № 7, сс. 25-32.

152 Сахаров А.С. Моментная схема конечных элементов (МСКЭ) с учетом жестких смещений // В кн. «Сопротивление материалов и теория сооружений». – Киев: «Будівельник», 1974, Вып. 24, сс. 147-156.

153 Сахаров А.С., Соловей Н.А. Исследование сходимости метода конечных элементов в задачах пластин и оболочек // В кн. «Пространственные конструкции зданий и сооружений». – М.: «Стройиздат», 1977, Вып. 3, сс. 10-12.

- 154 Ильченко Е.Н., Сахаров А.С. О решении больших систем уравнений при расчете пластин и оболочек // В кн. «Сопротивление материалов и теория сооружений». – Киев: «Будівельник». 1972, Вып. 24, сс. 259-263.
- 155 Самуль В.И. Основы теории упругости и пластичности. – М: «Высшая школа», 1982. – 264 с.
- 156 Акт № 1-06/449 от 18.11.82 «О проведении испытаний защитной оболочки на плотность и прочность». – ОП «Южно-Украинская АЭС», утв. 30.10.82. – 2 с.
- 157 Южно-Украинская АЭС. Блок № 1. Система преднапряжения защитной оболочки (СПЗО). Расчетное обоснование пригодности защитной оболочки к эксплуатации по результатам КПР в 1992 г. 210502.0422142.00001.601 КЖ.Р1. – М.: Государственный научно-исследовательский, проектно-конструкторский и изыскательский институт (ГНИППКИИ) «Атомэнергопроект», 1992. – 76 с.
- 158 ПНАЭ Г-7-002-86. Нормы расчета на прочность оборудования и трубопроводов атомных энергетических установок.. – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 528 с.
- 159 ПНАЭ Г-10-021-90. Правила устройства и эксплуатации локализующих систем безопасности атомных станций. – М.: Госпроматомнадзор СССР, 1990. – 102 с.
- 160 ГОСТ 14637-89. Прокат толстолистовой из углеродистой стали обыкновенного качества. Технические условия.
- 161 Южно-Украинская АЭС. Энергоблок № 1. Отчет по анализу безопасности. Анализ проектных аварий АПА. Итоговый отчет. 23.1.27.ОБ.02. – ОП «Южно-Украинская АЭС», 2009 (Annex O. DBA Analysis «SUSA-550DL12R.DBA Decrease in Primary Coolant Inventory, Revision 2» – 334 с.).
- 162 Отчет о результатах работы по теме: «Получение расчетных обоснований поэтажных спектров ответа и максимальных ускорений от сейсмических воздействий для отметок установленного оборудования первой очереди, которое подлежит квалификации». 01.00-22.1965-01. Объекты первой очереди ЮУ АЭС. Расчетное обоснование поэтажных спектров ответа при квалификации оборудования на сейсмическое воздействие 0,12g. – ОП «Южно-Украинская АЭС»

(Днепропетровск: ООО «Фундаментстроймакс»), 2011, пог. листом  
Держатомрегулювання України від 17.05.12 № 15-31/3-1/3064. – 234 с.

163 Южно-Украинская АЭС. Энергоблок № 1. Отчет по анализу безопасности. Анализ запроектных аварий АЗПА. Итоговый отчет. 23.1.27.ОБ.03.00 – ОП «Южно-Украинская АЭС», 2009.

164 Расчетное обоснование системы удаления водорода из ГО при запроектных авариях для энергоблоков № 1, 2 ОП ЮУАЭС. – ГП НАЭК «Энергоатом», 15.11.12. – 138 с.

165 Луговий П.З. Про вплив характеру імпульсного навантаження на динаміку оболонок // Доп. АН УРСР. Сер. А. Фіз.-мат. та техн. науки, 1990, – № 2 – сс. 41-44.

166 Гальбарт В.А., Иванов М.Ф., В. Н. Минеев В.Н., Фортов В.Е., Фунтиков А.И., Утюжников С.В., Шутов А.В. Воздействие взрыва водорода на защитную оболочку реакторного зала АЭС // Матем. моделирование, 2002, том 14, № 1, сс. 73-86.

167 Пономарев С.Д., Бидерман В.Л., Лихарев К.К., Макушин В.М., Малинин И.И., Феодосьев В.И. Расчеты на прочность в машиностроении. Том III. – М: Гос. н.-т. изд-во машиностроительной литературы, 1959. – 264 с.

168 Баженов Ю.М. Бетон при динамическом нагружении. – М.: «Стройиздат», 1970. – 272 с.

169 Крицкий В.Б., Крицкий А.Б., Мудрагель С.А. Численное моделирование НДС защитной оболочки реакторного отделения АЭС при динамическом нагружении // Вестник Национального технического университета Украины «Киевский политехнический институт». К.: «Машиностроение», 1997, – Вып. 32. – сс. 256-259.

170 Кислоокий В.Н., Крицкий В.Б., Легостаев А.Д., Цыхановский В.К., Шимановский А.В. Комплекс программ для статических и динамических расчетов нелинейных комбинированных конструкций // Сопротивление материалов и теория сооружений, вып. 48. – К.: «Будівельник», 1986.

171 Крицкий В.Б. Комплекс программ «ДИПРОС» (Динамика и прочность оболочечных систем). Описание применения (сокращенный вариант). – К.: Киев.

инж.-строит. ин-т, 1990. – 70 с. Деп. в УкрНИИНТИ 26.07.90, № 1222-Ук90.

172 Крицкий А.Б., Крицкий В.Б., Эффективная схема построения редуцированных нелинейных уравнений для оболочек на основе моментной схемы конечных элементов (МСКЭ) // Сопротивление материалов и теория сооружений, Вып. 62. – К.: «Будівельник», 1996. – сс. 88-99.

173 А.Б.Крицкий, С.А.Мудрагель Численное моделирование динамического поведения защитной оболочки реакторного отделения АЭС // Прогрессивная техника и технология машиностроения, приборостроения и сварочного производства. - Киев: НТТУ «КПИ», 1998, сс. 165-168.

174 Майборода Е.Е., Рыжов Д.И., Крицкий В.Б., Леткова Н.Г., Шугайло А-р.П., Шугайло А.П. О необходимости проведения исследований сейсмической опасности площадок АЭС Украины с использованием современных международных требований и подходов // Зб. наук. праць СНУЯЕтаП. – 2007, № 3, (23) – сс. 155-164.

175 Крицкий В.Б., Майборода Е.Е., Рыжов Д.И., Шугайло А-р.П., Шугайло А.П. Проблемные вопросы в нормативной базе Украины по обеспечению сейсмостойкости строительных конструкций, систем и элементов ядерных установок // Ядерна та радіаційна безпека. – 2006, т. 9, вип. 2. – с. 34-40.

176 Крицкий В.Б., Рыжов Д.И. Оценка применения норм по обеспечению сейсмостойкости для проекта большепролетного арочного сооружения (НБК) над объектом «Укрытие» ЧАЭС // Міжвідомчий науково-технічний збірник «Будівельні конструкції». –2005, т. 2.

177 Крицкий В.Б., Майборода Е.Е., Улановский М.Г. О результатах сопоставительных расчетов защитной оболочки реакторного отделения ВВЭР-1000/B-320 // The Analysis of Pre-stress Loss in Tendons of the WWER-1000 Containments. International Conference Proceedings. GRS, Berlin, Germany, 12-19.12.1998. – Berlin, Germany: GRS, 1999. – сс. 141-158.

178 Krytskyy V.B., Gasanenko V.A. Probabilistic Approaches in Assessment of Strength Reliability of NPP's Concrete Containment // Simulation in Industry'2000. 12th European Simulation Symposium 2000. ESS'2000. September 28-30.2000. Hamburg, Germany. [SCS]. – The Netherlands, Delft: The Society for Computer Simulation

International, 2000, pp. 577-581.

179 Noor A.K. Recent Advances in Reduction Methods for Non-Linear Problems. Computers and Structures, 1981, Vol. 13, № 1-3, pp. 31-44.

180 Noor A.K., Peters J.M. Multiple-parameter Reduced Basis Technique for Bifurcation and Postbuckling Analysis of Composite Plates. – Int. J. Numer. Meth. Engng., 1983, Vol. 19, № 12, pp. 1783-1803.

181 Noor A.K., Peters J.M. Recent Advances in Reduction Methods for Instability Analysis of Structures. – Computers and Structures, 1983, Vol. 16, № 1-4, pp. 67-80.

182 Noor A.K., Peters J.M. Reduce Basis Technique for Nonlinear Analysis of Structures. – AIAA Journal, 1980, Vol. 18, № 4, pp. 455-462.

183 Krytskyy V.B. About Use in Ukraine the FEM Assessments and Grounds of the Strength and Reliability of the Nuclear Installation's Structures // The Finite Element Analysis of Degraded Concrete Structures. OECD/NEA Workshop Proceedings. Brookhaven National Laboratory, Upton, New York, USA, 29-30.10.1998. – Paris, France: OECD, 1999. – pp. 88-92.

184 Krytskyy V.B. Karnauhov A.A., Ulanovskyy M.G. Service Life Predication and Ageing Management of WWER-1000 NPP's Concrete Containment Pre-stress System // Life Predication and Ageing Management of Concrete Structures. International Conference Proceedings. Bratislava, Slovakia, 06-08.07.1999. – Bratislava, Slovakia: Expertcentrum, 1999. – pp. 203-206.

185 Krytskyy V.B. Analysis of Shelter (Sarcophagus) Structures Possibility Collapse under Seismic Input and Probabilistic Assessments of Following Severe Accident Occur // Seismic Risk. OECD/NEA Workshop Proceedings. Tokyo, Japan, 10-12.08.1999. – Paris, France: OECD, 1999. pp. 123-129.

186 Krytskyy V.B. The Normative Requirements, Design Bases, Researches and Assessments in the Field of Ukrainian NPP's Seismic Safety // Review Procedures for Seismic Re-Evaluation of Equipment and Components. IAEA International Workshop Proceedings. Vienna, Austria, 05-07.06.2000. – Vienna, Austria: IAEA, 2000. pp. 63-69.

187 Krytskyy V.B. Siting and Loading Aspects in Structural Safety Analysis of Ukrainian NPPs in Relation to Extreme External Events // Structural Safety of NPPs in Relation to Extreme Loads. IAEA International Workshop Proceedings. Vienna, Austria, 04-08.12.2000. – Vienna, Austria: IAEA, 2001. pp. 83-92.