

СУПЕРКОМПЬЮТЕРНАЯ ТЕХНОЛОГИЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ ЖИЗНЕННОГО ЦИКЛА ОСОБО СЛОЖНЫХ ТЕХНИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ

Ключевые слова: параллельные вычисления, модель, жизненный цикл, метод конечных элементов, объекты строительства, ЛИРА-cluster, Инпарком.

ВВЕДЕНИЕ

В созданной суперкомпьютерной технологии моделирования жизненного цикла и прогноза безопасной эксплуатации особо сложных технических объектов для решения нелинейной задачи применяются шагово-итерационные методы. Для определения напряженно-деформированного состояния (НДС) на любом шаге нагружения, включая разрушение, применяется метод конечных элементов (МКЭ). Для организации и проведения численных экспериментов используются суперкомпьютер Инпарком и программный комплекс (ПК) ЛИРА-cluster.

1. МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ

Строится разрешающее уравнение с помощью МКЭ для системы сооружение-основание (рис. 1) при неравномерных деформациях земной поверхности на основе классического вариационного принципа Лагранжа [1].

Полная потенциальная энергия пространственной системы сооружение-основание определяется как

$$\Pi = U - W = \frac{1}{2} \int_{\Omega} \sigma \varepsilon d\Omega - \int_{\Omega} p u d\Omega,$$

где U — потенциал деформации, W — потенциал внешних сил. Из условия минимума функционала полной потенциальной энергии системы определяем неизвестные степени свободы

$$\frac{\partial}{\partial q_i} \Pi(q) = \frac{\partial}{\partial q_i} U(q) - \frac{\partial}{\partial q_i} W(q) = 0; \quad i = 1, 2, \dots, n.$$

После дифференцирования функции многих переменных система алгебраических уравнений в матричных символах имеет вид $[K]\{q\} = \{P\}$, где $[K]$ — матрица жесткости системы сооружение-основание; $\{q\}$ — вектор степеней свободы системы; $\{P\}$ — вектор внешних сил системы (вес сооружения, воздействие от неравномерных деформаций земной поверхности).

Дискретизация конечных элементов (КЭ) системы сооружение-основание приводит к выражению

$$\Pi = \sum_{r=1}^n \Pi_r = \sum_{r=1}^n U_r - \sum_{r=1}^n W_r.$$

Разрешающее уравнения равновесия системы сооружение-основание представляется как

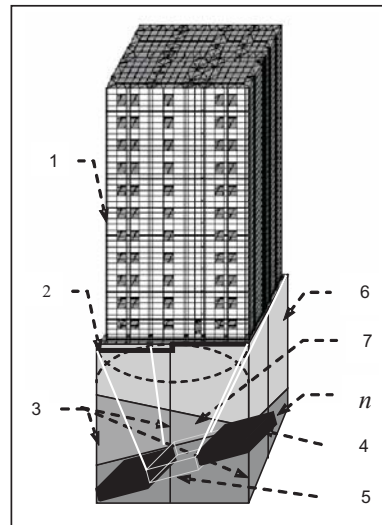


Рис. 1. Схема системы сооружение-основание: 1 — пространственная система сооружения; 2 — законы деформации земной поверхности; 3 — вертикали геологического разреза; 4 — пласт на глубине ~ 1000 м; 5 — выработка; 6, 7, ..., n — слои основания

$$\frac{\partial}{\partial q_i} \sum_{r=1}^n \Pi_r(q_i) = \frac{\partial}{\partial q_i} \sum_{r=1}^n U_r(q_i) - \frac{\partial}{\partial q_i} \sum_{r=1}^n W_r(q_i),$$

отсюда следует

$$\frac{\partial}{\partial q_r} U(q_r) = [k]_r \{q\}_r, \quad \frac{\partial}{\partial q_r} W(q_r) = \{P\}_r.$$

Исходя из принципа возможных перемещений, элемент матрицы жесткости r -го КЭ имеет вид

$$k_{ij,r} = \int_{\Omega} \sigma_i \varepsilon_j d\Omega.$$

Форма перемещений по области r -го строительного элемента (СЭ) имеет вид $u_r = \sum_{i=1}^n q_i f_i$. Аппроксимирующий полином распределения перемещений f_i отвечает q_i -й степени свободы.

Компоненты НДС r -го КЭ:

$$\{\varepsilon\}_r = [D][u]_r \{q\}_r; \quad \{\sigma\}_r = [E]_r \{\varepsilon\}_r; \quad \{R\}_r = [k]_r \{q\}_r,$$

где $[u]_r$ — матрица аппроксимирующих функций перемещений r -го КЭ.

2. МЕТОДОЛОГИЯ НЕЛИНЕЙНОГО АНАЛИЗА

Для решения физически нелинейной задачи применим метод последовательного нагружения, с помощью которого нелинейная система уравнений заменяется рекуррентной последовательностью линейных. Применение общего метода нелинейного анализа позволяет проследить действительное поведение системы во всем диапазоне нагрузок, начиная с ненагруженного состояния, включая состояние нелинейной деформации материалов конструкций и грунта, завершая процесс нагружения разрушением системы. Величина разрушающей нагрузки определяется в процессе нелинейного расчета на основе принятых критериев разрушения по достижению предельных деформаций или предельных напряжений в элементах системы [1].

Решение физически нелинейной задачи выполняется за несколько шагов методом последовательного нагружения. Для определения компонентов НДС системы на каждой ступени нагружения используется МКЭ в перемещениях.

Схема метода последовательного нагружения состоит в следующем. Назначается число видов нагрузок $j \geq 1$ и число степеней нагружения $i^{(m)} \geq 1$ для каждого m -го вида нагружения. Устанавливаются законы нагрузки и приросты узловых нагрузок для каждого m -го вида нагружения: $\Delta P^{(m,n)} = \lambda^{(m,n)} P^{(m,n)}$. Вычисляются касательные жесткостные характеристики и на их основе коэффициенты матрицы жесткости r -го КЭ $k_r^{(m,n+1)}$, соответствующие $q^{(m,n)}$.

По сумме соответствующих коэффициентов строится $K^{(m,n+1)}$.

Определяются приросты степеней свободы $\Delta q^{(m,n+1)}$ из решающего уравнения МКЭ системы сооружение-основание на $(n+1)$ -й ступени m -го вида нагружения

$$\sum_{m=1}^j \sum_{n=1}^{i^{(m)}} K^{(m,n+1)} \Delta q^{(m,n+1)} = \sum_{m=1}^j \sum_{n=1}^{i^{(m)}} \Delta P^{(m,n+1)}.$$

По полученным $\Delta q^{(m,n+1)}$ определяются приросты компонентов НДС КЭ: $\{\Delta \varepsilon\}_r^{(m,n+1)}$, $\{\Delta \sigma\}_r^{(m,n+1)}$. Находятся суммарные значения компонентов НДС системы после $(n+1)$ -й степени нагружения $q^{(m,n+1)} = q^{(m,n)} + \Delta q^{(m,n+1)}$; $\{\varepsilon\}_r^{(m,n+1)} = \{\varepsilon\}_r^{(m,n)} + \{\Delta \varepsilon\}_r^{(m,n+1)}$; $\{\sigma\}_r^{(m,n+1)} = \{\sigma\}_r^{(m,n)} + \{\Delta \sigma\}_r^{(m,n+1)}$.

3. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОБОСНОВАНИЕ ДОСТОВЕРНОСТИ МОДЕЛИ И МЕТОДОЛОГИИ

Адекватность математической модели и методологии нелинейного анализа систем сооружение-основание обоснована сопоставлением данных многочисленных исследований по результатам известных отечественных и зарубежных экспериментальных исследований и натурных испытаний сооружений при силовых и деформационных нагрузениях, в частности девятиэтажного экспериментального здания серии 179 на обрабатываемых территориях Донбасса, спроектированного КиевЗНИИЭП с участием Донецкого ПромстройНИИпроекта. Несущая пространственная система сооружения длиной 26,4 м образована из системы продольных и поперечных несущих стен, объединенных дисками перекрытий. Высота этажа — 2,8 м, пролет перекрытий в осях — 5,7 м. По периметру всех стен здания спроектированы этажные железобетонные пояса, расположенные в конструкциях стеновых панелей.

Для проведения комплекса исследований построены следующие три комбинации пространственных моделей экспериментального здания при ступенчатых деформациях земной поверхности: модель 1 — линейное сооружение — линейное основание; модель 2 — линейное сооружение — нелинейное основание; модель 3 — нелинейное сооружение — нелинейное основание.

Линейная пространственная модель 1 (рис. 2, 3) построена на основе декомпозиции сооружения из следующих типов суперэлементов с использованием пластинчатых КЭ в условиях плоского напряженного состояния и изгиба: суперэлемента подвала (1); суперэлемента 1-го этажа (2); суперэлемента типовых 2-, 4-, 6-, 8-го этажей (3); суперэлемента типовых 3-, 5-, 7, 9-го этажей (4); суперэлемента технического этажа (5); суперэлемента перекрытий этажей (6). В основную схему входят модели поверхности основания и балочного фундамента с использованием стержневых КЭ в условиях пространственного нагружения.

Анализ полученных результатов вычислений свидетельствует о существенном качественном и количественном различии в распределении напряжений в пространственных моделях 1, 2, 3. Существенное выравнивание по высоте стены и снижение максимальных по абсолютной величине главных напряжений получены в пространственной модели 2 за счет нелинейного моделирования поверхности основания. При использовании модели 3 нелинейное сооружение — нелинейное основание, величины главных напряжений $N1$ и $N3$ практически выравниваются по высоте сооружения, а также существенно снижаются их максимальные значения по абсолютной величине в сравнении с данными ли-

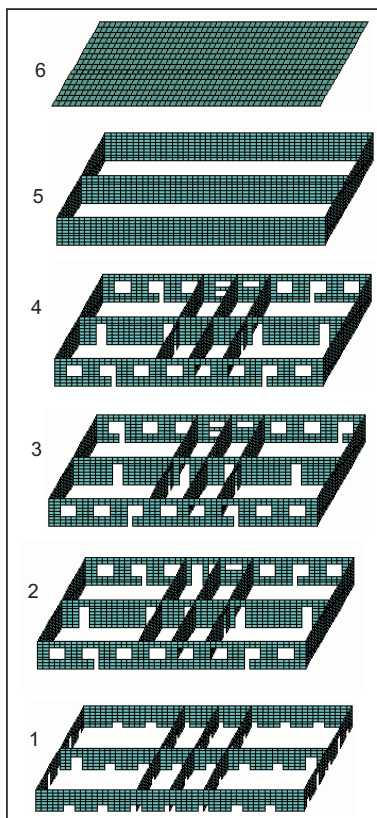


Рис. 2. Декомпозиция здания на основе суперэлементов



Рис. 3. 3D модель сооружения

нейной модели 1. Полученное многократное снижение значений главных напряжений (в 2–3 раза по сравнению с данными линейно-упругого расчета) позволили обеспечить допустимый по условиям эксплуатации сооружения уровень раскрытия трещин при заданных параметрах деформаций земной поверхности. Приведенная на рис. 4 расчетная схема раскрытия трещин и зон их распределения по продольной стене практически совпадает с аналогичными данными натурального испытания сооружения.

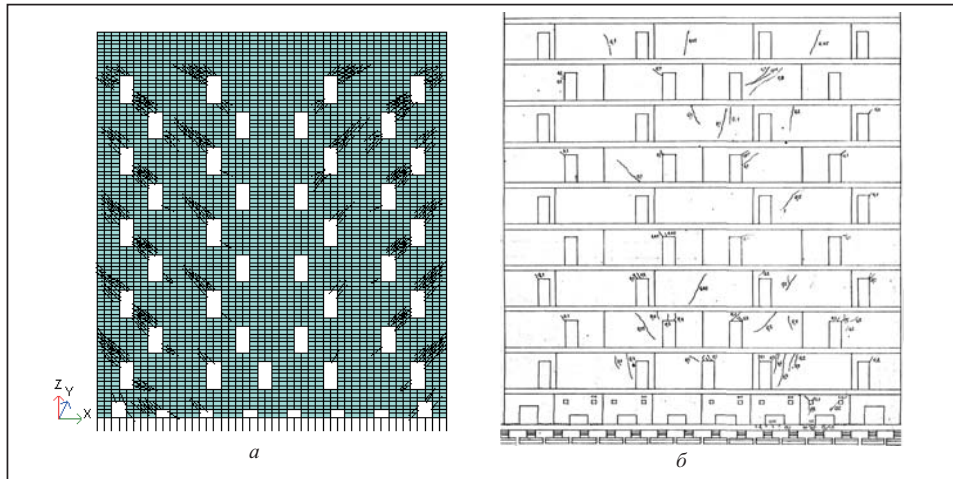


Рис. 4. Конечно-элементная модель 3 (а), схема натурального эксперимента (б): схема развития трещин во внутренней продольной стене

4. ОБОСНОВАНИЕ ДОСТОВЕРНОСТИ МЕТОДОЛОГИИ АНАЛИЗА БЕЗОПАСНОСТИ ЭКСПЛУАТАЦИИ ЗАЩИТНЫХ ОБОЛОЧЕК АЭС УКРАИНЫ

Для теоретического обоснования достоверности оценки и прогноза безопасности эксплуатации АЭС проведен комплекс численных исследований напряженно-деформированного состояния защитной оболочки АЭС и сопоставлены результаты исследований, полученных с помощью ПК ЛИРА (Украина) и ADINA (GRS, Германия, проект SR 2075/5-5-1-UA-1595 «Сравнительные расчеты для контента по динамическим нагрузкам в результате внутренних и внешних воздействий для украинских АЭС с ВВЭР-1000»).

В многоуровневой системе безопасности АЭС одну из ключевых позиций занимает система герметичного ограждения, изолирующая ядерный реактор от окружающей среды и также локализирующая последствия возможных аварий. Система герметичного ограждения реакторных отделений ВВЭР-1000 является сложным инженерным сооружением неоднородной структуры и включает следующие элементы:

- железобетонные ограждающие конструкции, включая систему защитной оболочки (рис. 5);

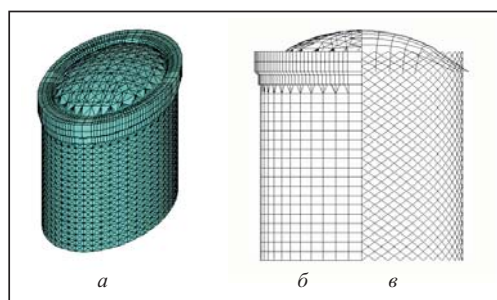


Рис. 5. МКЭ модели защитной оболочки украинских АЭС с реакторами ВВЭР-1000/В-320: а — общий вид модели защитной оболочки; б — фрагмент модели защитной оболочки; в — фрагмент модели системы предварительно напряженных армоканатов

- систему преднапряжения (предварительно напряженная арматура, каналообразователи, ненапрягаемая арматура);
- герметизирующая стальная облицовка;
- элементы, устанавливаемые в герметичное ограждение (шлюзы, люки).

Результаты получены для следующих видов нагружений защитной оболочки:

- собственный вес;
- преднапряжение, усилие натяжения в армоканатах до 10000 кН;
- внутреннее давление до 0,46 МПа.

Для сопоставления графики перемещений и изополя напряжений срединной поверхности защитной оболочки приведены на рис. 6, 7.

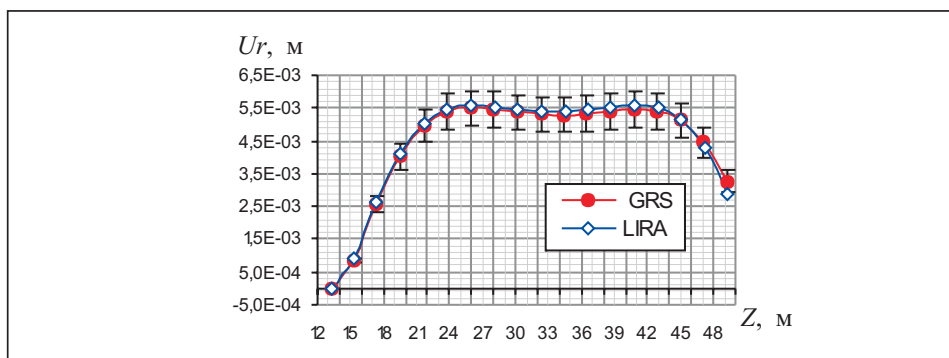


Рис. 6. График защитной оболочки ВВЭР-1000/В-320. Цилиндрическая часть. Радиальные перемещения срединной поверхности, зависящие от влияния внутреннего давления 0,46 МПа

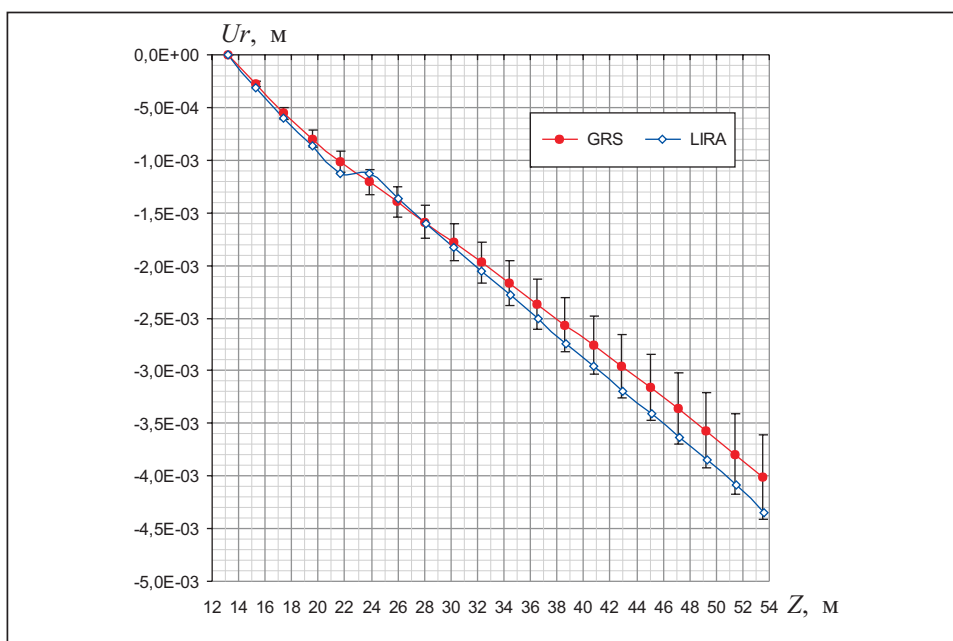


Рис. 7. График защитной оболочки ВВЭР-1000/В-320. Цилиндрическая часть. Вертикальные перемещения срединной поверхности, зависящие от влияния предварительного напряжения

5. ЭФФЕКТИВНОСТЬ ТЕХНОЛОГИИ ПАРАЛЛЕЛЬНЫХ ВЫЧИСЛЕНИЙ

Возможности методологии численного анализа рассмотренных классов объектов проиллюстрируем на примерах решения ряда особо сложных практических задач численного анализа безопасности реконструкции 14-этажного аварийного жилого дома, построенного на слабых грунтах в Москве (Россия), девятиэтажных аварийных жилых домов в Тбилиси (Грузия) и Катовице (Польша) [1–5].

Эффективное решение этих особо сложных и других сверхбольших задач выполнено на суперкомпьютере Инпарк и ПК ЛИРА-cluster с использованием высокопроизводительных технологий параллельных вычислений.

Входные данные задачи формируются ПК ЛИРА на многопроцессорной рабочей станции Инпарк. Сформированные входные данные соответствующей задачи записываются в файлы, используя принятые в ПК ЛИРА форматы данных (см. рис. 8, на котором представлена так называемая небоскребная матрица). Далее

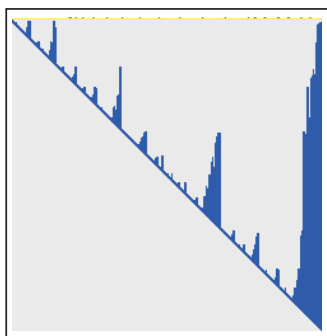


Рис. 8. Схема небоскрежной матрицы защитной оболочки ВВЭР-1000/В-320

на Инпарком запускается параллельная программа Inparsoft, которая:

- анализирует параметры и определяет алгоритм решения задачи;
- считывает исходные данные из файлов и распределяет их по процессорам в соответствии с выбранным параллельным алгоритмом решения задачи;
- исследует и решает задачу;
- сохраняет результаты решения задачи для дальнейшего использования постпроцессором ПК ЛИРА.

Общая схема реализованной технологии параллельных вычислений с использованием ПК ЛИРА на Инпарком состоит из трех этапов:

- создание расчетной модели ПК ЛИРА,
- расчет ПК ЛИРА + Inparsoft (Инпарком),
- анализ результатов на ПК ЛИРА.

В табл. 1 приведено время решения системы линейных алгебраических уравнений (СЛАУ) тестовой задачи с помощью ПК ЛИРА-cluster на Инпарком, а также время решения этих задач ПК ЛИРА на одноядерном ПК.

Таблица 1

Номер п/п	Порядок матрицы	Плотность матрицы, %	Время решения, мин		Соотношение времени
			ПК ЛИРА	ЛИРА-cluster на Инпарком	
1	43 950	49	3,4	0,131	26,03
2	44 436	21	2,6	1,354	1,92
3	44 436	2	0,9	0,109	8,26
4	283 031	7	16,4	1,222	23,42
5	300 000	100	3	0,188	15,92
6	666 000	85	27	1,989	13,58
7	1 000 332	85	41	3,001	13,66
8	1 332 000	85	54	3,942	13,70
9	1 332 000	85	54	2,802	19,27
10	1 200 000	100	102	4,776	21,36

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Создана эффективная методология численного анализа уникальных сооружений на суперкомпьютере Инпарком с применением ПК ЛИРА-cluster. Результаты разработки проблемно-ориентированного комплекса ЛИРА-cluster+Инпарком используются отечественными и зарубежными организациями в учебном процессе, при разработке нормативных документов, в процессе проектирования, а также при оценке безопасности эксплуатации и реконструкции высотных сооружений, защитных оболочек АЭС Украины и др.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Слободян Я. О. Оцінка точності чисельного розв'язання нелінійних контактних задач взаємодії споруд з основами / Опір матеріалів і теорія споруд. — Київ. — 2002. — Вип. 70. — С. 136–144.
2. Слободян Я. Е. Расчет жилых зданий на нелинейно-деформируемом основании при карстовых проявлениях // Строительные конструкции. — Киев. — 1993. — Вып. 45–46. — С. 107–110.
3. Клепиков С. Н., Слободян Я. Е. Расчет конструкций сооружений на многократные воздействия вертикальных и горизонтальных смещений земной поверхности // Problemy naukowo-badawcze budownictwa. — Rzeszow: Politechnika Rzeszowska. — Т. 2. — 1994. — Р. 115–122.
4. Slobodyan Y., Majewski S., Genzerskiy Y. FEM software package LIRA-W for structural design // Finite Element Methods & Standards. — Stuttgart: Universitat, 1997. — Р. 67–75.
5. Городецкий А. С., Слободян Я. Е. Решение нелинейных задач взаимодействия сооружений с основанием с помощью ПК ЛИРА / Проблемы тонкостенных пространственных систем. — Тбилиси: Грузинский технический университет, 2001. — С. 53–57.

Поступила 28.07.2009