

**ЧИСЛЕННЫЕ МОДЕЛИ 4-ГО ЭНЕРГБЛОКА ЧАЭС  
ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ПОВЕДЕНИЯ ЕГО КОНСТРУКЦИЙ  
В ЭКСПЛУАТАЦИОННОМ, АВАРИЙНОМ И ПОСТАВАРИЙНОМ СОСТОЯНИЯХ**

С использованием архивной документации построена конструктивная схема эксплуатационного состояния 4-го энергоблока ЧАЭС. Разработаны различные варианты пространственных конечно-элементных моделей, позволяющих с различной степенью детализации реализовать конструктивную схему 4-го энергоблока с помощью различных вычислительных комплексов COSMOS, SCAD и ROBOT. Выполнены расчеты характерных напряженно-деформированных состояний 4-го энергоблока при различных сочетаниях нагрузок и воздействий для оценки эффективности разработанных вариантов конечно-элементных моделей. На основе анализа полученных результатов произведен выбор расчетной модели 4-го энергоблока ЧАЭС для дальнейших численных исследований механического поведения его конструкций, в том числе в процессе запроектной аварии и в ходе локализации и ликвидации ее последствий.

Настоящая работа выполнена в рамках проблемы обеспечения безопасной эксплуатации существующего объекта «Укрытие» 4-го энергоблока ЧАЭС. Цель данной работы заключалась в следующем:

построение конструктивной схемы доаварийного 4-го энергоблока ЧАЭС на основе анализа сохранившейся проектной и конструкторской документации на строительство 2-й очереди ЧАЭС;

разработка пространственных конечно-элементных моделей, позволяющих с различной степенью детализации реализовать построенную конструктивную схему с помощью вычислительных комплексов (ВК) COSMOS, SCAD и ROBOT;

выполнение расчетов характерных доаварийных напряженно-деформированных состояний 4-го энергоблока при различных сочетаниях нагрузок и воздействий для оценки эффективности разработанных вариантов конечно-элементных моделей;

выбор на основе анализа полученных результатов рациональной расчетной схемы предаварийного 4-го энергоблока ЧАЭС для дальнейших численных исследований, в том числе процесса развития запроектной аварии реактора и определения поставарийного состояния его конструкций.

**Конструктивная схема объекта.** Построение конструктивной схемы 4-го энергоблока ЧАЭС выполнено с учетом всех его несущих строительных конструкций. При этом их геометрия соответствует реальной геометрии стен, перекрытий и каркасной части блока.

Перегородки толщиной менее 0,05 м при построении конструктивной схемы не учитывались ввиду малого влияния их жесткости на общее напряженно-деформированное

© Н. Г. Ищенко, А. В. Шимановский, Н. А. Сирота, М. В. Герасимова, 1998

состояние объекта. По этой же причине в конструктивную схему не включены: сборные перекрытия, расположенные между осями 50-51; проемы в стенах и перекрытиях, размеры

которых в обоих направлениях не превышают 1,5 м; навесные стеновые панели ограждения и конструкции реактора.

**Конечно-элементные модели строительных конструкций для численных исследований.** Ввиду сложной конструкции 4-го энергоблока ЧАЭС, с целью проверки результатов расчетов и подтверждения принятых исходных предпосылок и допущений, при формировании его конечно-элементных моделей использовались три вычислительных комплекса: COSMOS (версия 1.52A) [1], SCAD (версия 6.1) [2] и ROBOT (версия V6 v.3.0) [3].

Выбор конечно-элементных моделей для проведения дальнейших исследований проводился на основе анализа результатов расчетов эксплуатационного состояния 4-го энергоблока ЧАЭС, которое рассматривалось как контрольное и использовалось для отработки эффективного численного аппарата последующего моделирования процесса развития запроектной аварии реактора и поставарийного поведения конструкций блока.

**Модель для проведения численных исследований с использованием ВК COSMOS.** В связи с наличием ряда ограничений в используемой версии ВК COSMOS, при построении конечно-элементной модели 4-го энергоблока применен суперэлементный подход. Общая расчетная модель рассматриваемого сооружения состоит из отдельных составляющих фрагментов единого расчетного блока - суперэлементов (рис. 1), каждый из которых в свою очередь собран с использованием отдельных фрагментов - «поэтажных планов».

Учитывая, что с конструктивной точки зрения рассматриваемое сооружение представляет собой комбинированную систему весьма сложной конфигурации, включающую в себя элементы различной мерности и жесткости, при построении его расчетной модели использовались оболочечные и стержневые конечные элементы. Так, железобетонный каркас объекта описан стержневыми конечными элементами, воспринимающими усилия растяжения - сжатия и изгиба, для которых приняты реальные геометрические и жесткостные характеристики. Стены и перекрытия 4-го энергоблока аппроксимировались четырехузловыми оболочечными конечными элементами, толщина которых соответствовала реальной толщине стен и перекрытий сооружения. Модуль упругости материала указанных конструкций  $E$  принят равным  $2,4 \cdot 10^4$  МПа, а коэффициент Пуассона  $m=0,28$ .

Количество узлов и конечных элементов в каждом суперэлементе соответственно равно: первый суперэлемент - 1865 и 2015; второй суперэлемент - 1865 и 2016; третий суперэлемент - 1250 и 1238; четвертый суперэлемент - 1220 и 1208; пятый суперэлемент - 1902 и 2048; шестой суперэлемент - 1810 и 1860. Нанесенная на данную конструкцию сеть конечных элементов содержит 9912 узлов и 10385 конечных элементов. Суперэлементы соединены друг с другом с помощью суперузлов, обеспечивающих работу всего объекта как единою целого. Учитывая ограничения, установленные в ВК COSMOS, для соединения всех шести суперэлементов в единую расчетную модель в данной модели используется 186 суперузлов.

**Модель для проведения численных исследований с использованием ВК SCAD.** В связи с тем, что ВК SCAD обладает большими возможностями в отношении порядка системы разрешающих уравнений, при формировании числовой модели могут быть

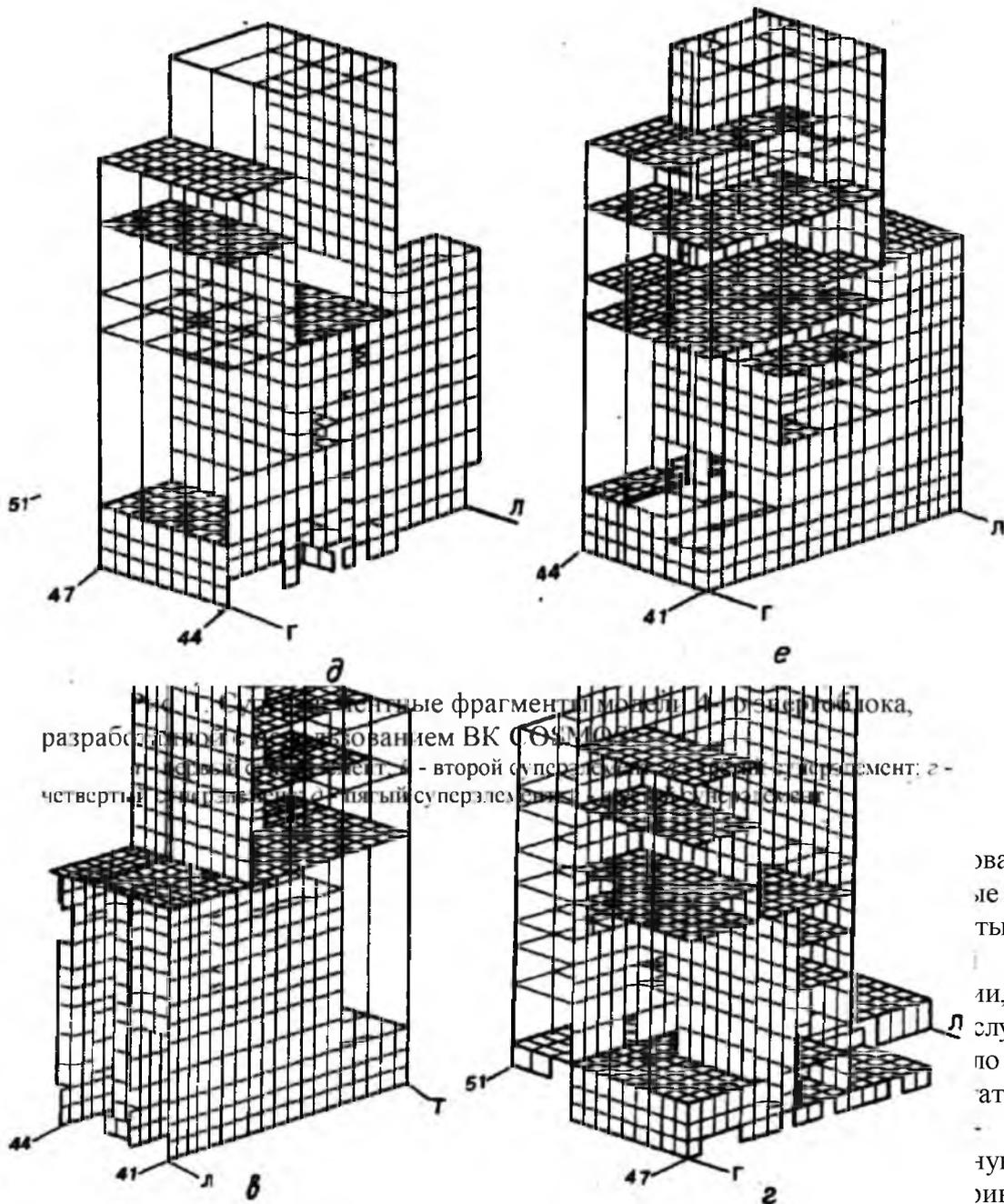


Рис. 2. Конечные фрагменты модели 4-го энергоблока, разработанной с использованием ВК ROBOT. а - первый суперэлемент; б - второй суперэлемент; в - третий суперэлемент; г - четвертый суперэлемент.

46-47

эваны  
ле  
ты более

ли, чем в  
случае. Это  
по  
ать вторую

ую модель  
иваемого

сооружения как

общую для всего 4-го энергоблока без применения суперэлементного подхода (рис. 2). При этом она также собрана из отдельных фрагментов - «поэтажных планов», в данном случае единых для всего объекта. Нанесенная на рассматриваемую конструкцию сеть конечных элементов содержит 9668 узлов и 10385 конечных элементов.

Поскольку в обеих моделях топологическая сеть конечных элементов идентична, количество конечных элементов в них совпадает, а количество узлов в первой модели больше, так как при стыковке суперэлементов сливаются только суперузлы. При этом конечно-элементная аппроксимация, физико-механические и геометрические характеристики конечных элементов во второй модели полностью совпадают с соответствующими характеристиками первой модели.

#### **Модель для проведения численных исследований с использованием ВК ROBOT.**

Третья конечно-элементная модель разработана с использованием ВК ROBOT (рис. 3). В данной модели приняты некоторые упрощения при отображении конструктивной схемы объекта на расчетную: не учтен каркас между осями 50-51, стены по осям Е-Ж и П-Р, а также стены по осям 46, 47 и 48 в отметках +0,0 + +9,0 м, вместо них с целью сохранения общей жесткости сооружения низ стен в осях Д-Е и Р-С опущен до отметки +0,0 м. Все остальные основные несущие стены между осями 42-50 и Д-С в отметках +0,0 ÷ +56,0 м и главные

перекрытия на отметках +9,00 м, +31,5 м и +50,0 м представлены в конечно-элементной модели.

Нанесенная на рассматриваемую конструкцию сеть конечных элементов содержит 1880 узлов и 2104 конечных элемента. При аппроксимации строительных конструкций 4-го энергоблока в данной модели использовались четырехугольные и треугольные оболочечные конечные элементы, толщина которых соответствовала реальной толщине стен и перекрытий.

**Граничные условия.** Поскольку в представленной работе ставилась цель построения расчетных моделей 4-го энергоблока с использованием трех различных вычислительных комплексов и их последующего сопоставления, то в соответствии с обычными предпосылками расчета строительных объектов податливость основания не учитывалась. Поэтому условия закрепления реализованы в виде полного защемления нижней грани стеновых конструкций.

46-47

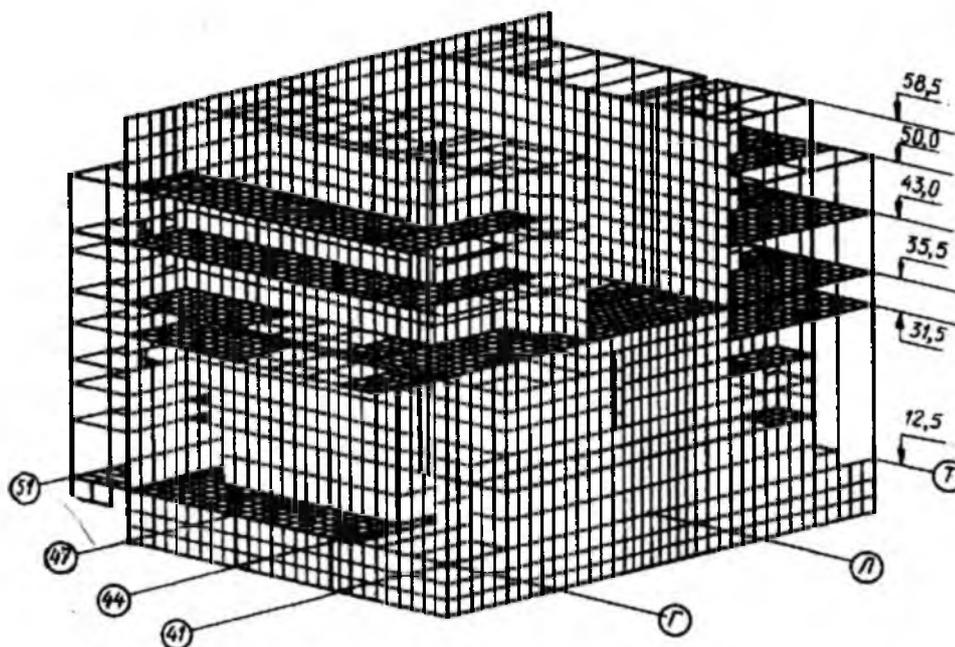


Рис. 2. Конечно-элементная модель 4-го энергоблока, разработанная с использованием ВК SCAD

**Действующие нагрузки и их сочетания.** Исследование работы конструкций 4-го энергоблока произведено с учетом действующих на него постоянных, временных и некоторых экстремальных нагрузок. К учтенным в расчетах постоянным нагрузкам относятся собственный вес строительных конструкций 4-го энергоблока и вес технологического оборудования. Собственный вес конструкций во всех используемых ВК учитывался автоматически, а собственный вес некоторых, не вошедших в конечно-элементные модели конструкций, учитывался в месте их расположения в виде приложенных к несущим элементам соответствующих сосредоточенных и распределенных нагрузок. Вес технологического оборудования учтен для барабанов-сепараторов, главных циркуляционных насосов, разгрузочно-загрузочной машины РЗМ-488 и реактора РБМК-1000.

Согласно [4] масса одного барабана-сепаратора в рабочем состоянии составляет 2,745 МН. В 4-м энергоблоке находится всего четыре барабана-сепаратора, нагрузка от которых приложена в местах их опирания на соответствующие перекрытия на отметке +31,5 м в виде сосредоточенных сил.

В соответствии с [4] вес одного главного циркуляционного насоса составляет 0,69 МН. В 4-м энергоблоке находится всего восемь главных циркуляционных насосов, нагрузка от которых приложена в местах их опирания на перекрытие на отметке +12,5 м в виде сосредоточенных сил.

Основным элементом разгрузочно-загрузочной машины является тележка крана общим весом 2,0 МН. Отметка расположения РЗМ-488 совпадает с верхом крышки реактора, поэтому ее вес приложен в виде распределенной, нагрузки интенсивностью 0,0568 МПа на опоры реактора, которые моделировались крестообразной конструкцией; их верх находится на отметке +16 м. Вес реактора РБМК-1000 также приложен к его опорам в виде распределенной нагрузки интенсивностью 1,1 МПа.

48

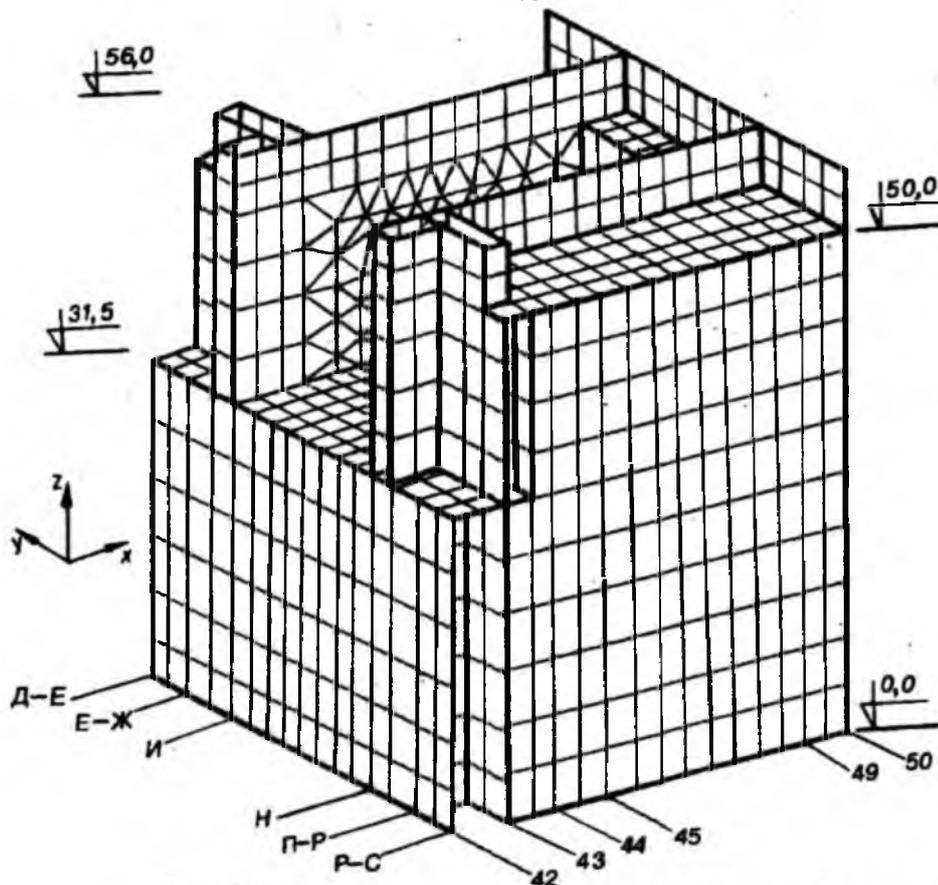


Рис. 3 Конечно-элементная модель 4-го энергоблока, разработанная с использованием BK ROBOT

В качестве временных нагрузок учтены снеговая и ветровая нагрузки, значения которых определены в соответствии с требованиями [5] и представлены в [6].

**Анализ результатов расчетов.** Расчет описанных выше конечно-элементных моделей 4-го энергоблока проведен на три сочетания нагрузок, включающих в себя: первое - собственный вес сооружения, нагрузку от технологического оборудования, снеговую и ветровую нагрузки в направлении «Запад-Восток»; второе - собственный вес сооружения, нагрузку от технологического оборудования, снеговую и ветровую нагрузки в направлении «Север-Юг»; третье - собственный вес сооружения, нагрузку от технологического оборудования и сейсмическое воздействие в направлении «Запад-Восток». Кроме того, проведен расчет на четвертое нагружение в виде равномерного избыточного давления интенсивностью 0,1 МПа, приложенного на конструкции помещения центрального зала.

Указанные нагрузки и их сочетания не охватывают всего многообразия нагрузок и воздействий в эксплуатационном состоянии на строительные конструкции 4-го энергоблока, поскольку результаты выполненных расчетов использовались, в основном, для оценки эффективности разработанных вариантов конечно-элементных моделей. В последующих

49

исследованиях выбранная рациональная конечно-элементная модель применялась для численного моделирования процесса развития запроектной аварии реактора и определения поставарийного поведения конструкций разрушенного блока [7].

Выбор конечно-элементной модели для проведения дальнейших исследований проводился на основе сопоставления результатов расчетов, выполненных с помощью различных вычислительных комплексов, а также на основе анализа присущих комплексам возможностей.

Сопоставление результатов по каждой из описанных выше моделей на статические и динамические нагрузки показал достаточно хорошее их совпадение. Например, параметры напряженно-деформированного состояния по первой и второй моделям совпадают в пределах 5-7 % [6], что объясняется почти полным подобием не только их топологических схем, но и размеров конечных элементов.

По второй и третьей моделям, поскольку они различаются степенью детализации конструктивной схемы, сопоставление результатов расчета проводилось для идентично расположенных узлов и элементов. Анализ показывает, что различие полученных результатов по сравнению со второй моделью находится в пределах 11-13 % [6].

Исходя из ограничений и возможностей, присущих принятой версии ВК COSMOS, расчет конструкции 4-го энергоблока можно провести только в суперэлементной постановке, которая не позволяет выполнить решение рассматриваемой задачи к динамической постановке на действие сейсмических воздействий, ветровых, импульсных и других нестационарных нагрузок. Тем не менее, эта конечно-элементная модель наиболее удобна для решения отдельных локальных задач как в линейной, так и в нелинейной постановке, связанных с уточнением результатов расчетов или с учетом локальных внешних воздействий для каждого отдельного суперэлемента.

Ограничения и возможности ВК SCAD позволяют достаточно эффективно с относительно небольшими временными затратами провести статические расчеты 4-го энергоблока ЧАЭС, не прибегая к суперэлементной постановке, без учета и с учетом геометрической и физической нелинейности. При этом результаты получаются более достоверными по сравнению с результатами суперэлементного подхода в связи с более точным учетом взаимодействия отдельных составляющих конечно-элементной модели фрагментов. При решении же динамических задач с использованием второй конечно-элементной модели затраты машинного времени значительно возрастают, что не всегда приемлемо. Поэтому для решения задач в динамической постановке целесообразно применение более простой (упрощенной топологически) конечно-элементной модели, которая разработана с использованием ВК ROBOT.

1. *User reference manual for COSMOS / M BASIC SYS.* - Los Angeles Structural Research & Analysis Corp., 1989. - 694 p.
2. *Руководство пользователя вычислительным комплексом SCAD.* - Киев: НПП «Топаз-Информ», 1996. - 528 с.
3. *User reference manual for ROBOT // Meylan: RoboBAT.* - 1995. - 348 p.
4. *Дополнительная экспертиза состояния строительных конструкций укрытия аварийного блока ЧАЭС // Отчет по НИР, НИИМБП по договору № 5-МБПот 04.01.94 / Руководитель темы Ю. В. Верюжский.* - Кн. 4: Исследование напряженно-деформированного состояния строительных конструкций 4-го энергоблока ЧАЭС и объекта «Укрытие» - Киев, 1995. - 66 с.
5. *СНИП 2.01.07-85 «Нагрузки и воздействия».* - М.: ЦИТП Госстроя СССР, 1986. - 36 с.

50

6. *Исследование и численное моделирование ответственных конструкций и грунтов основания объекта «Укрытие» // Отчет по НИР, НИИМБП / Руководитель темы Ю. В. Верюжский.* - Кн. 3: Построение расчетной модели 4-го энергоблока ЧАЭС для численных исследований - Киев, 1996. - 114 с.

7. *Исследование и численное моделирование ответственных конструкций и грунтов основания объекта «Укрытие» // Отчет по НИР, НИИМБП / Руководитель темы Ю. В. Верюжский.* - Кн. 4: Моделирование напряженно-деформированного состояния строительных конструкций 4-го блока ЧАЭС при запроектной аварии. - Киев, 1996. - 294 с.