

УДК 539.3:624.05

Н. Г. Ищенко, К. И. Анкянец, С. Ю. Фиалко, М. Н. Скуратовский, Н. Ю. Анкянец

МОДЕЛИРОВАНИЕ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ СТРОИТЕЛЬНЫХ КОНСТРУКЦИЙ 4-ГО ЭНЕРГБЛОКА ЧАЭС ПРИ ЗАПРОЕКТНОЙ АВАРИИ

Работа посвящена моделированию поведения строительных конструкций 4-го энергоблока при аварийном воздействии в начальной стадии запроектной аварии. Рассмотрена одна из возможных версий аварии. Величины аварийных воздействий получены из решения задачи газодинамики. Численное исследование поведения конструкций 4-го энергоблока произведено на основе метода конечных элементов (МКЭ). Для анализа динамической реакции системы на заданную нагрузку применялось численное интегрирование уравнений движения по методу Ньюмарка. Принята приближенная методика определения критериев разрушения для железобетонных конструкций и выполнен анализ результатов расчета.

В настоящей работе представлены некоторые промежуточные результаты комплексных исследований [1, 2] состояния механической структуры объекта «Укрытие» (ОУ) на основе численного моделирования термомеханического поведения его конструкций, начиная от их исходного доаварийного состояния в составе 4-го энергоблока ЧАЭС с учетом аварийных и послеаварийных их превращений до нынешнего состояния в составе ОУ. Исследования выполнялись с целью построения численного аппарата для объектно-ориентированного программно-технического комплекса (ПТК), который выполнял бы в автоматизированном режиме функции адекватной оценки и прогнозирования напряженно-деформированного состояния (НДС) конструкций ОУ.

Общая методика численного моделирования с целью создания ПТК разработана в НИИМБП и предложена для реализации руководству ОУ и ЧАЭС в 1994 г. [3]. Она была создана с учетом приобретенного институтом к тому времени опыта участия [4] в предотвращении аварийной ситуации, связанной с возможным обрушением нестабильного узла опирания балок Б1, Б2 у пересечения осей 50 и Ж. Суть этой методики состоит в последовательном переходе с помощью численных методов механики сплошной среды от компьютерных моделей доаварийного НДС конструкций 4-го энергоблока к моделям их поставарийного НДС на момент завершения активной стадии аварии 06.05.86 г. и, далее, к моделям нынешнего (непрерывно изменяющегося в силу протекающих в ОУ деградиационных процессов и потому именуемого «текущим») НДС конструкций, составляющих сложившуюся после аварии механическую структуру ОУ.

© Н. Г. Ищенко, К. И. Анкянец, С. Ю. Фиалко, М. Н. Скуратовский, Н. Ю. Анкянец, 1998

51

При этом для определения аварийных воздействий на конструкции 4-го энергоблока численно моделируется термомеханическая стадия аварии, включая процессы локального разрушения конструкций и материалов активной зоны РБМК-1000, а также инициированные ими газодинамические процессы [5]. Для определения послеаварийных воздействий на конструкции уже разрушенного 4-го энергоблока численно моделируются термомеханические процессы послеаварийных событий, включая локализацию последствий аварии, в том числе возведение укрытия в 1986 г., проводившиеся после 1986 г. усиления конструкций, землетрясение 1990 г. и другие события [8], способные оказать влияние на текущее НДС механической структуры ОУ, в которой доминируют конструкции разрушенного 4-го энергоблока.

Основным преимуществом изложенного подхода к исследованию состояния конструкций ОУ, по мнению авторов, является уникальная для условий ОУ достоверность исходных данных. Она определяется тем, что исходные данные для построения первоначальной модели доаварийного НДС конструкций 4-го энергоблока берутся из достаточно полной проектной и исполнительной документации 2-й очереди строительства ЧАЭС, имеющейся в различных архивах [6]. При любом же другом подходе к решению проблемы конструкций объекта исследователь (как показывает опыт не только НИИМБП) сталкивается с непреодолимой в условиях ОУ неполнотой и противоречивостью исходных данных, сводящей к нулю практическую ценность результатов.

Представленные ниже результаты относятся к моделированию процесса аварийного разрушения строительных конструкций 4-го энергоблока, которое является ключевой процедурой реализации общей методики проводимых исследований. Эта процедура имеет циклический характер и включает в себя [7]:

- решение задачи динамики путем интегрирования уравнений движения;
- анализ напряженно-деформированного состояния элементов конструкции и принятие решения о характере и степени их разрушения;
- преобразование расчетной модели объекта исследования и передача начальных и граничных условий из решения предыдущего шага по времени.

Численная модель доаварийного НДС конструкций блока Б построена по достоверным исходным данным методом конечных элементов (МКЭ), реализованным в перемещениях. Выполнено исследование сходимости решений для 3-х вариантов дискретизации исходной конечно-элементной модели [6].

Моделирование динамического поведения конструкций блока при аварийных воздействиях осуществляется в конечно-элементной реализации прямым интегрированием уравнений движения [7]. Для оценки разрушения конструкций в вычислительных процедурах приняты упрощенные критерии прочности железобетона.

В качестве основных воздействий на строительные конструкции приняты статические и аварийные динамические. Статические нагрузки определены от веса строительных конструкций и технологического оборудования. Климатические воздействия из-за их малости не учитывались. На методике определения аварийных динамических нагрузок остановимся несколько детальней.

Динамические нагрузки определяются из решения уравнений газодинамики для пространственно-временной функции, моделирующей распространение волн сжатия.

52

Здесь для наглядности рассмотрен один из простейших пространственно-энергетических эквивалентов аварии реактора, происшедшей 26.04.86 г. Функция пространственного распределения динамической нагрузки в шахте реактора принимается в виде равномерно распределенного давления.

Величину импульсной динамической нагрузки, распределенной в пространстве, таким образом, можно считать ввиду относительной малости объема шахты реактора начальным приближением к истинному значению аварийной нагрузки. Под ее воздействием крышка реактора (схема Е) смещается вверх и сжатый газ из шахты начинает поступать в центральный зал и помещения барабанов-сепараторов [5]. На этой основе моделируется воздействие в виде избыточного импульсного давления на стены и перекрытия центрального зала и помещений барабанов- сепараторов.

Задача определения параметров пространственно-временной функции распределения давления на строительные конструкции решалась при оценке расхода пара в 19,2 кг/с через один разрушенный ТК с помощью конечноразностных методов газодинамики на основе подхода Мак-Кормака [5]. Результаты решения задачи газодинамики получены для исходного давления в шахте реактора 16 атм. При этом максимальное давление на стены центрального зала достигает 2 атм.

Пространственно-временное распределение давления зависит от порядка и времени разрушения стен и перекрытий. В свою очередь разрушение конструкций зависит от распределения нагрузок. Таким образом, ответ на вопросы: какие нагрузки и в какие моменты времени действовали на строительные конструкции; в каком порядке происходило их разрушение - ищется на основе проведения многовариантных расчетов, что и дает основание называть численным моделированием решение задачи в целом.

Давление, возникшее в центральном зале при разрушении реактора, аппроксимировалось распределенной нагрузкой, приложенной к поверхности стен по осям И, Н и 49. В общем виде вектор нагрузки для модели МКЭ представлялся функцией

$$P(x, y, z, t) = P(x, y, z) \cdot f(t),$$

где $P(x, y, z)$ - вектор, задающий пространственную конфигурацию нагрузки, $f(t)$ - функция, задающая закон изменения нагрузки от времени. График зависимости изменения нагрузки во времени представляет собой двухзвенную ломаную, характеризующую рост нагрузки от 0 до 2 атм. за 0,01 с и дальнейшее ее падение до нуля за 0,2 с.

Конечно-элементная модель [1-3] учитывает все основные несущие стены между осями 42-50 и Д-С, а также главные перекрытия на отметках 9,00, 31,5, 50,0 м. Для

моделирования основных несущих стен блока использовались четырехугольные и треугольные оболочечные элементы типа SHELL. Конструкция полагалась жестко заземленной на отметке 0,00 м. Построенная таким образом модель блока содержит 10326 степеней свободы, 1880 узлов, 2104 элемента.

Для определения напряжений, возникающих в элементах конструкций от собственного веса, использовалась ветвь статического анализа Linear Static программы ROBOT V.6 [9]. Для анализа динамической реакции системы на заданную нагрузку применялось прямое численное интегрирование по методу Ньюмарка, реализованное в ветви Transient Analysis.

53

В качестве первого приближения критериев разрушения приняты формулы СНиП для расчета элементов железобетонных конструкций по прочности. В соответствии со временем проектирования и строительства второй очереди ЧАЭС использован СНиП II-В. 1-62*; для расчета стен применялись формулы (99), (100) из [10].

Предполагая, что разрушение конструкций происходит из-за роста изгибающих моментов при практически неизменной нормальной силе, условие (99) принимается выполняющимся в виде равенства и используется для нахождения положения нейтральной оси, т. е. величины x .

Ввиду того, что данный этап расчета является первым приближением, служащим для отработки методики расчета сооружения в целом, использованы дополнительные упрощения при проверке прочности. К этим упрощениям отнесены следующие: площадь сжатой арматуры и толщина защитного слоя равны нулю, поэтому $h_0 \approx h$. Кроме того, отсутствуют проверки по поперечной силе ввиду отсутствия в расчетной схеме стержневых элементов.

Так как в выполненном расчете результаты представлены в виде напряжений σ_{\max} и σ_{\min} , полученных в предположении упругой работы каждого сечения, формулы (99) и (100), заимствованные из [10], удобно преобразовать, используя зависимости напряжений от усилий.

После соответствующих преобразований формула (100) из [10] приобретает вид

$$2\sigma_{\max} + \sigma_{\min} \leq 3(\sigma_{\max} + \sigma_{\min} + 2\mu R_a) \cdot \left(1 - \frac{\sigma_{\max} + \sigma_{\min} + 2\mu R_a}{4R_u}\right),$$

где μ - коэффициент армирования по растянутой арматуре.

Для бетона М400 $/P_u = 210$ кг/см², для арматуры класса АIII - $R_a = 3400$ кг/см². Для среднего коэффициента армирования $\mu = 0,003$ критерий разрушения приобретает вид

$$\begin{aligned} & 2\sigma_{\max} + \sigma_{\min} > \\ & > 3(\sigma_{\max} + \sigma_{\min} + 20,4 \text{ кг / см}^2) \times \\ & \times \left(1 - \frac{\sigma_{\max} + \sigma_{\min} + 20,4 \text{ кг / см}^2}{840 \text{ кг / см}^2}\right) \end{aligned}$$

Для плит перекрытий при тех же предположениях критерий прочности имеет более простой вид:

$$\sigma_{\max} \leq 6\mu R_a \cdot \left(1 - \frac{\mu R_a}{2R_u}\right).$$

Для $R_a = 3400$ кг/см², $R_u = 210$ кг/см² и $\mu = 0,005$ критерий разрушения $\sigma_{\max} > 98$ кг/см².

В результате численного моделирования получены картины разрушений в конечной стадии процесса деформирования вплоть до снятия аварийных воздействий. В качестве примера полученных результатов на рис. 1, 2 приведены, соответственно, деформированное и напряженное состояние стены по оси И.

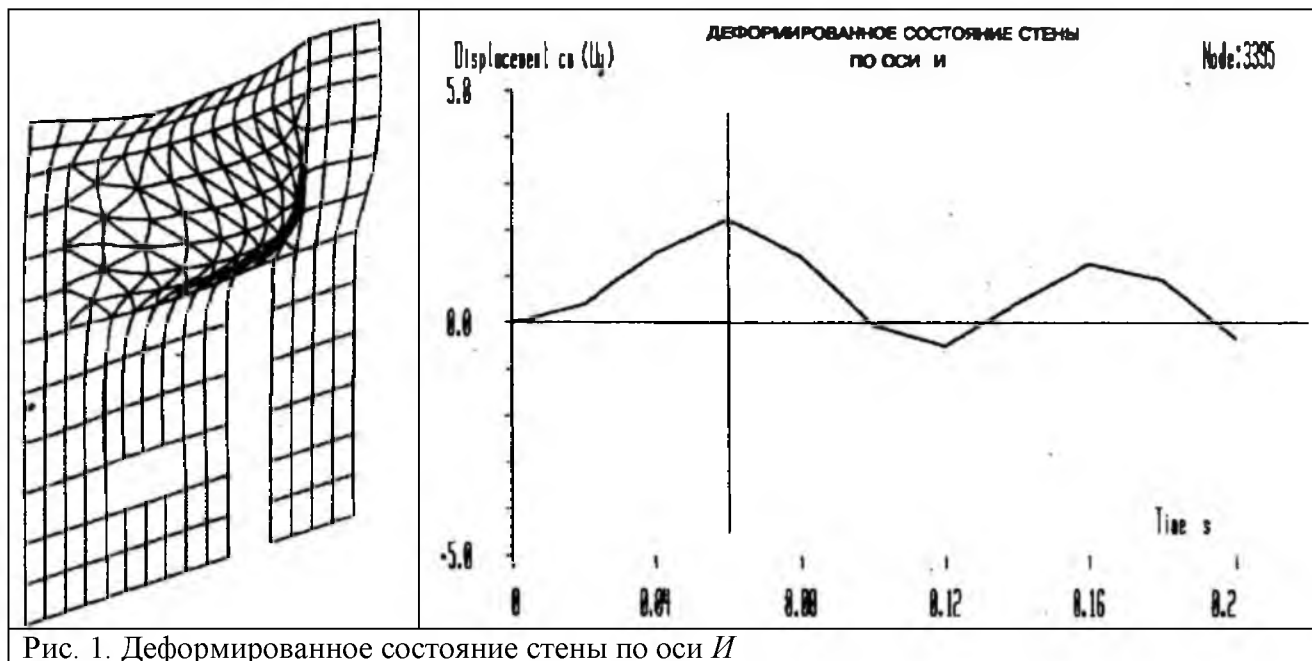


Рис. 1. Деформированное состояние стены по оси *II*

54

График перемещений характерной точки стены (узел 3395) на рис. 1 соответствует приведенной здесь же картине деформирования в момент времени $t=0,16$ с, который обозначен на графике вертикальной линией. Следует отметить, что точки на дискретной схеме и интервал времени для графиков перемещений выбирались из условия обнаружения разрушающих напряжений. Поэтому они не характеризуют величины перемещений узлов в конечной стадии деформирования

На рис. 2 приведена картина напряженного состояния стены по оси *II* для того же момента времени $t=0,16$ с, когда реакция системы достигает экстремального значения. Картина отражает распределение нормальных к вертикальным сечениям стены напряжений в ее поверхности со стороны помещения южных барабанов-сепараторов.

Документирование результатов моделирования выполнялось в графическом и табличном виде. Для каждого элемента конструкции (стена, перекрытие) получено визуализированное представление полей компонент тензора напряжений и вектора перемещений.

Визуализированные результаты численного моделирования сопоставлялись с имеющимися материалами натурных обследований конструкций разрушенного 4-го энергоблока. При этом совпадение отдельных, доступных для обследования фрагментов фактической картины разрушений и соответствующих фрагментов численной картины разрушений являлось основным критерием адекватности численного моделирования. Кроме того, полученные численные результаты указывали на наличие в сложившейся механической структуре ОУ как общеизвестных, так и ранее неизвестных разрушений конструкций.

Последующие натурные обследования, целенаправленно выполненные сотрудниками НИИМБП, подтвердили наличие этих, ранее не обнаруженных из-за сложности доступа к ним, разрушений. Тем самым были доказаны и прогностические возможности численного моделирования в отношении НДС конструкций ОУ, а также его эффективность для повышения целенаправленности натурных исследований.

55

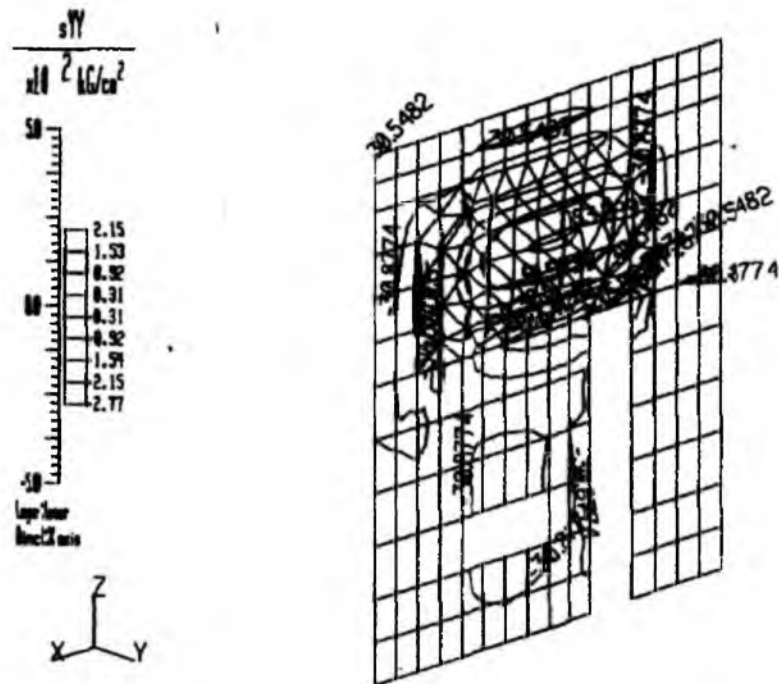


Рис. 2. Картина напряжений в стене по оси *И*

Результаты численного моделирования позволил обследователям оценить возможные картины состояния конструкций ОУ и определить ожидаемые места их повреждений еще до выходов на блок. Поэтому, заблаговременно подготавливаясь, они действовали оперативно и смогли с минимальной дозой нагрузки в высоких гамма-полях впервые за прошедшие после аварии годы обнаружить и зафиксировать на фотографиях разрушения, предсказанные расчетным путем [11]. Укажем некоторые характерные в этом плане разрушения строительных конструкций ОУ, обнаружение которых в натуре стало возможным в результате выполнения работ по численному моделированию аварийного поведения конструкций блока Б.

1. Смещение двух южных барабанов-сепараторов относительно друг друга по горизонтали вдоль собственных продольных осей минимум на 40 см (максимум на 80 см), что свидетельствует о разрешении недоступного для обследования опорного узла на отм. 30,9 м центральной стойки опорной рамы как минимум под одним из барабанов-сепараторов. Критичность этой ситуации вряд ли нуждается в специальном обосновании, если учесть вес самих барабанов-сепараторов и завала, который они несут на себе.

2. Обрушение в осях 45-50 всех плит перекрытия южной барабан-сепараторной с отметкой 50,00 м на магистральные паропроводы. В результате почти вся нагрузка от опалубки у пересеченна осей 50 и Ж передается на сохранившийся монолитный участок этого перекрытия. Опалубка, являющаяся западной опорой южных главных балок Б1 и Б2 покрытия ОУ, имеет консольный вылет 370 см, тогда как консольный вылет участка всего 90 см. Следует отметить при этой, что только вес бетона в опалубке составляет около 700 т.

3. Раздвижка стен южного прочно-плотного бокса (помещение 617/3), на которые опирается перекрытие на отм. 30,9 м. В результате перекрытие, на которое опираются

56

южные барабаны-сепараторы, вышло из зацепления примерно на 30 см как с южной, так и с северной опорной стеной ниже отм. 30,9 м.

4. Полное разрушение в осях 43-44, примерно между отметками 43 м и 53 м, стены по оси *И* южной выхлопной шахты, являющейся восточной опорой южных главных балок Б1 и Б2 покрытия ОУ.

Полученные результаты исследований безусловно важны для понимания уровня фактически существующей безопасности ОУ, но они являются всего лишь промежуточными. Разработка ПТК и его численного аппарата на сегодня все еще не завершена по независящим

от авторов причинам, хотя эффективность реализуемой методики исследований апробирована практикой, а также признана отечественными и иностранными экспертами.

Завершение этой разработки в полном объеме представляется актуальным еще и потому, что оно будет означать появление информационно верифицированного и нормативно сертифицированного инструмента для научно обоснованного расчетного прогнозирования поведения конструкций ОУ. Опыт показывает, что без такого прогнозирования невозможно принятие значимых для безопасности ОУ решений, как проектных по преобразованию объекта, так и эксплуатационно-управленческих по предотвращению аварийных ситуаций.

Так, несмотря на общепризнанную нестабильность механической структуры ОУ, принятие проектных решений по ее стабилизации затянулось на годы и далеко от завершения. Одна из глубинных причин такого положения кроется в отсутствии объектно-ориентированного аппарата типа ПТК для расчетного обоснования этих решений по принципу «риск - польза».

Что касается решений по эксплуатационному управлению безопасностью ОУ, то с 1994 г., когда был реализован проект предотвращения обрушения аварийного узла опирания балок Б1, Б2 у пересечения осей 50 и Ж, разработанный ВНИПИЭТ на основе исследований НИИМБП [4], до настоящего времени на ОУ не реализован ни один сколь-нибудь значимый для безопасности объекта проект усиления конструкций. И хотя потребность в этом бесспорна, она пока лишь интуитивно осознается, но не обосновывается строго из-за отсутствия расчетного инструментария все того же типа.

В заключение следует отметить, что необходимость работы, кратко освещенной в настоящей публикации, была вызвана практической потребностью в знании текущего НДС как механической структуры ОУ в целом [1], так и отдельных ее элементов [4]. Без такого знания, которое в достаточном объеме и качестве на сегодня еще отсутствует, невозможно обеспечение безопасности объекта «Укрытие» на требуемом уровне.

1. *Дополнительная* экспертиза состояния строительных конструкций укрытия аварийного блока ЧАЭС // Отчет по НИР, НИИМБП по договору № 5-МБП от 04.01.94 / Руководитель темы Ю. В. Верюжский. - Кн. 1-5. - Киев, 1995. - 9 кн.

2. *Исследование* и численное моделирование надежности ответственных конструкций и грунтов основания объекта «Укрытие» // Отчет по НИР, НИИМБП / Руководитель темы Ю. В. Верюжский. - Киев, 1996. - 10 кн.

3. *Дополнительная* экспертиза состояния строительных конструкций укрытия аварийного блока ЧАЭС // Отчет по НИР, НИИМБП по договору № 5-МБП от 04.01.94 / Руководитель темы Ю. В. Верюжский. - Кн. 2: Общая методика экспертирования строительных конструкций 4-го энергоблока ЧАЭС и объекта «Укрытие». - Киев, 1995. - 66 с. - 9 кн.

4. *Исследование* состояния опорных конструкций балок укрытия Б1, Б2 в осях 47-51, Г-Л аварийного блока ЧАЭС // Отчет по НИР, НИИМБП по договору № 14 от 20.05.93 / Руководитель темы Ю. В. Верюжский. - Кн. Л: Численные исследования напряженно-деформированного состояния опорных конструкций. - Киев, 1993. - 382 с.

5. *Исследование* и численное моделирование надежности ответственных конструкций и грунтов основания объекта «Укрытие» // Отчет по НИР, НИИМБП / Руководитель темы Ю. В. Верюжский. - Кн. 2: Моделирование конструкций РБМК 1000 в эксплуатационном режиме и на стадии запроектной аварии. - Киев, 1996. - 453 с.

57

6. *Исследование* и численное моделирование надежности 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 надежности 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 энергоблока ЧАЭС при запроектной аварии. - Киев, 1996. - 294 с.

8. *Исследование* и численное моделирование надежности ответственных конструкций и грунтов основания объекта «Укрытие» // Отчет по НИР, НИИМБП / Руководитель темы Ю. В. Верюжский. - Кн. 5: Моделирование напряженно-деформированного состояния строительных конструкций объекта «Укрытие» при сейсмических воздействиях. - Киев, 1996 - 370 с.

9. *User reference manual for ROBOT V. 6.* - Meylan: RoboBAT. -1995. - 348 p.

10. *СНИП 2.03 01-84 «Бетонные и железобетонные конструкции».* - М.: ЦИТП Госстроя СССР, 1985. - 79 с.

11. *Дополнительная экспертиза состояния строительных конструкций укрытия аварийного блока ЧАЭС // Отчет по НИР, НИИМБП по договору № 5-МБП от 04.01.94 / Руководитель темы Ю. В. Верюжский. - Аннотация работ НИИМБП по этапу 1. - Киев, 1994. -64 с.*

Получено 11.05.96