

ОПТИМИЗАЦИЯ РАСЧЕТОВ ОГРАЖДАЮЩИХ КОНСТРУКЦИЙ ОБЪЕКТОВ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ АТОМНОЙ ЭНЕРГИИ ПРИ УДАРЕ САМОЛЕТА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПРОГРАММЫ ABAQUS

Попов А.И.¹ Тропкин С.Н.² Птицына А.В.¹

1) ОАО «Головной институт «ВНИПИЭТ», Санкт-Петербург, Россия

2) ООО «ТЕСИС», Москва, Россия

При расчетах объектов использования атомной энергии (ОИАЭ), дополнительно к нагрузкам нормальной эксплуатации (НЭ), возникает необходимость учета особых воздействий природного и техногенного происхождения: сейсмического воздействия, воздействия воздушной ударной волны, экстремальных ветровой и снеговой нагрузок, нагрузки вызванной смерчем, падения самолета.

Наиболее сложным из перечисленных обычно является расчет на удар самолета, т.к. помимо рассмотрения удара в различные точки конструкции необходимо решать задачу с получением значений, определяющих напряженно-деформированное состояние конструкции в различные моменты времени и позволяющих определить толщину бетонных ограждающих конструкций и подобрать необходимое количество арматуры.

Подобная методика требует очень большого времени на решение задачи и неизмеримо большего времени на анализ результатов по полученным значениям изгибающих моментов, продольных и перерезывающих сил, необходимых для расчетного подбора арматуры.

Время решения задачи во многом определяется коротким ударным импульсом от самолета и в связи с этим, необходимостью очень мелкого шага по времени при решении задачи для получения достаточной точности результатов.

Анализ результатов затрудняется тем, что вышеперечисленные силовые факторы достигают максимальных значений в различные моменты времени и правильная оценка их сочетаний при подборе арматуры требует длительного анализа и зачастую носит консервативный или субъективный характер.

Необходимо также отметить тот факт, что расчеты для объектов ОИАЭ, необходимо производить по аттестованным в отрасли программам.

В данной работе предлагается решать подобную задачу, разбив ее на три этапа:

- решение динамической задачи импульсного нагружения наиболее опасной части конструкции (имеющей наибольшие пролеты в свету);

- определение эквивалентной статической нагрузки, дающей аналогичные прогибы и напряжения;

- приложение полученной нагрузки к общей модели здания и проведение комплексного расчета на все виды воздействий с подбором арматуры, что является финальным этапом при проектировании.

Два первых этапа выполнены с использованием программы [ABAQUS](#), третий – с применением программы SCAD.

Используемые модули упомянутых программ аттестованы надзорными органами атомной отрасли и имеют соответствующие аттестационные паспорта и лицензии.

В данной работе рассчитано монолитное железобетонное здание.

Фундаментом служит монолитная железобетонная плита с размерами в плане 22.5×19.0 м, толщиной 1200 мм и отметкой низа -9.450.

Здание состоит из несущих монолитных конструкций: наружных стен, толщиной 0.9 м, внутренних стен толщиной 0.6м, перекрытий с отметками верха -3.600 (толщина 0,4 м), +0.900 (толщина 0,9 м), +7.400 (толщина 0,4 м) и покрытия с отметкой верха +12.450 (толщина 0,9 м). Характерный архитектурный разрез представлен на рисунке 1.

Здание выполнено из железобетона марки М300 (класса В25) с расчетным сопротивлением осевому сжатию $R_b = 14.5 \text{ МПа} = 148 \text{ кгс/см}^2$ и начальным модулем упругости естественного твердения $E_b = 30.0 \cdot 10^3 \text{ МПа} = 3.0 \cdot 10^5 \text{ кгс/см}^2$. Класс арматуры АIII с расчетным сопротивлением растяжению $R_s = 365 \text{ МПа} = 3650 \text{ кгс/см}^2$.

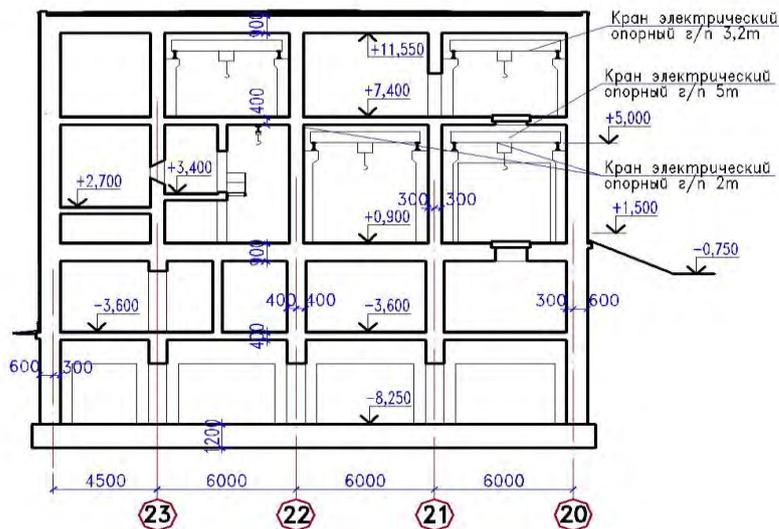


Рисунок 1- Характерный архитектурный разрез здания.

В качестве расчетной нагрузки при падении самолета была принята зависимость силы от времени при падении легкого гражданского самолета IV класса с массой 5 т и скоростью 60÷100 м/с, применявшаяся при расчетах зданий АЭС с реакторами ВВЭР-1000 и ВВЭР-1500.

Расчет проводился с помощью двух программных комплексов. С помощью ВК «ABAQUS» был проведен расчет на заданную функцию времени (см. рисунок 2) методом разложения по собственным формам колебаний. Далее была получена эквивалентная статическая нагрузка, дающая аналогичные прогибы и напряжения и с помощью ВК «SCAD» был проведен расчет на эквивалентные статические нагрузки с учетом коэффициентов динамичности квазистатическим методом.

Следует отметить, что проведенные расчеты относятся к анализу общей прочности строительных конструкций. Для оценки местной прочности можно воспользоваться результатами расчетов элементов железобетонной обстройки реакторного отделения блока АЭС с реактором ВВЭР-1000, где показано, что при толщине 0.9 м не происходит разрушения стен при ударах легких гражданских самолетов IV класса даже по нормали к поверхности сооружения.

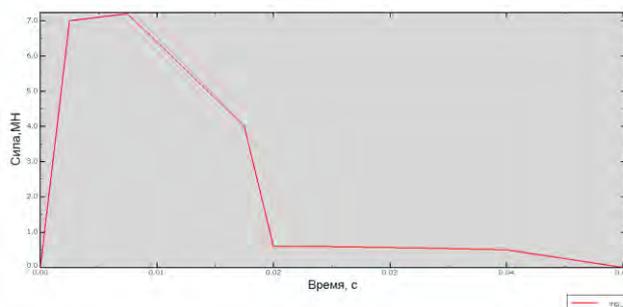


Рисунок 2 - Динамические воздействия при падении легкого гражданского самолета IV класса с массой 5 т и скоростью 60÷100 м/с (по нормали к поверхности сооружения)

Для общего расчета строительных конструкций здания была создана расчетная конечноэлементная модель (см. фрагмент расчетной схемы на рис 3).

В расчетной модели принята декартова системы координат, глобальная (X, Y, Z), связанная с расчетной моделью.

Модель выполнена с использованием конечных элементов:

оболочек (четырёхузловых элементов с шестью степенями свободы в узле) — для моделирования фундаментной плиты, стен, перекрытий и покрытия;
пружин (одноузловых элементов) — для моделирования грунтового основания.

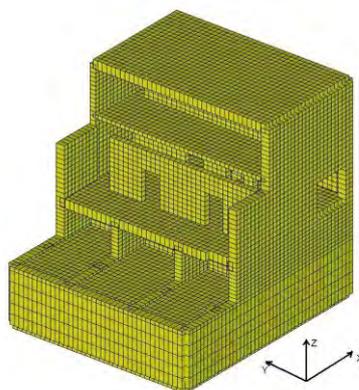


Рисунок 3 –Фрагмент расчетной схемы здания

Как сказано выше, расчет проводился по двум программным комплексам:

С помощью ВК «ABAQUS» выполнен динамический расчет наибольшего по площади фронтальной поверхности фрагмента стены с размерами 20х6 м. В итоге получена квазистатическая нагрузка, используемая далее в расчетах по ВК «SCAD». Следует отметить, что к покрытию квазистатическая нагрузка прикладывается с коэффициентом 0.707 (угол падения самолета принят равным 45° $\cos 45^{\circ} = 0.707$)

С помощью ВК «SCAD» проводится анализ напряженно-деформированного состояния (НДС) строительных конструкций пристройки, по результатам РСУ получены поля армирования наружных и внутренних стен, колонн заглубленной части, фундаментной плиты, плиты покрытия и перекрытий сооружения.

В результате динамического расчета был проведен анализ напряженно-деформированного состояния фрагмента стены.

На рисунке 4 представлена кривая зависимости линейных перемещений (м) от времени (с) вдоль линии действия удара, в точке приложения нагрузки. Из графика видно, что максимальные перемещения составляют 0.0018 м и достигаются в момент времени 0.008 с.

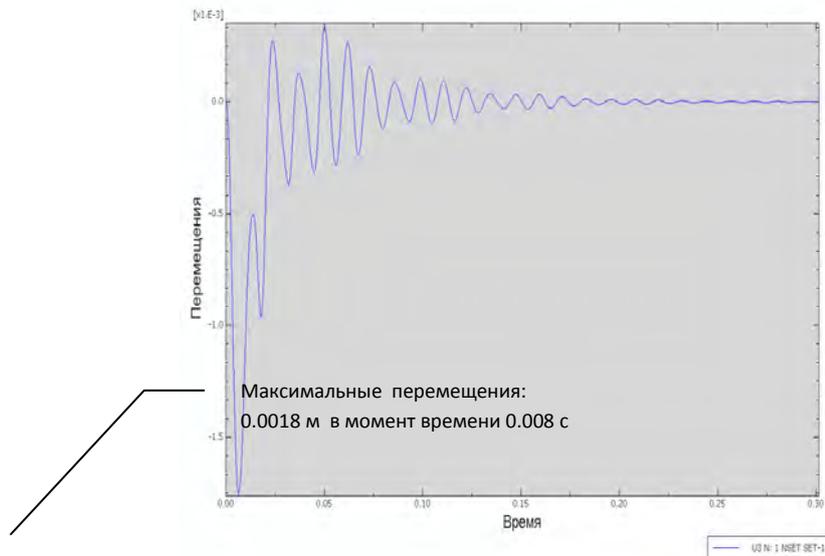


Рисунок 4 - Зависимость линейных горизонтальных перемещений (м) от времени (с) вдоль линии действия удара в точке расчетной модели с максимальными деформациями (в точке стены фасада) при падении самолета на фасад

На рисунке 6 приведены деформированная модель фрагмента и поле распределения горизонтальных перемещений (м) вдоль линии действия удара самолета в момент времени 0.008 с (максимальные перемещения составляют $0.00018 \text{ м} = 1.8 \text{ мм}$).

Для проведения расчета на падение самолета был рассмотрен фрагмент наружных ограждающих конструкций здания - часть стены, общими размерами $20000 \times 6000 \times 900 \text{ мм}$, защемленная по контуру. Для более точного расчета были использованы две расчетные модели - одна объемная, состоящая из четырехузловых пирамидальных конечных элементов, другая плоская из элементов оболочки. Объемная модель создана для определения напряжений на противоположной грани в месте приложения нагрузки, плоская для определения деформаций.

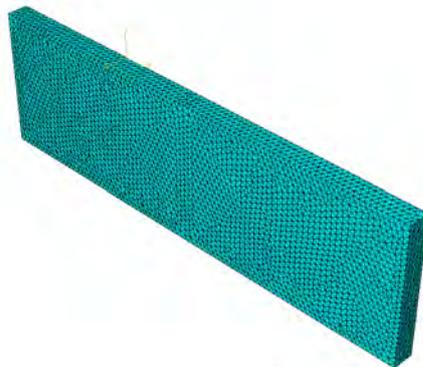


Рисунок 5 - Вид расчетной модели фрагмента здания

В результате динамического расчета в месте приложения нагрузки в плоской модели был получен максимальный прогиб 1,8 мм (рисунок 6). Квазистатическая нагрузка 830т является эквивалентной нагрузкой (рисунок 7).

На рисунках 8 и 9 приведены поля растягивающих напряжений, соответствующих приложению динамической и статической нагрузок, соответственно.

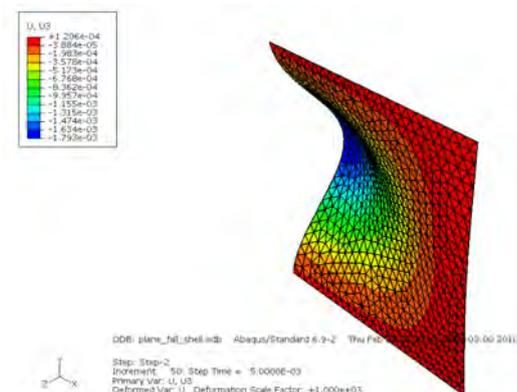


Рисунок 6 - Деформированное состояние фрагмента стены при динамическом действии нагрузки

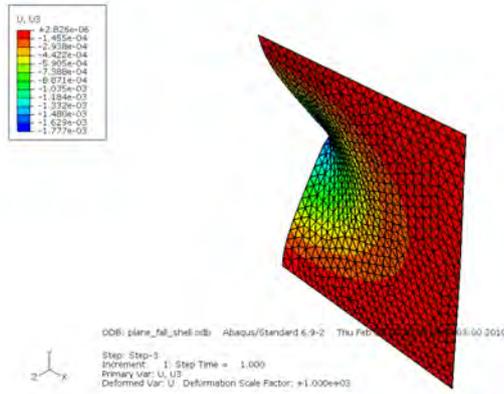


Рисунок 7 - Деформированное состояние фрагмента стены при статическом действии нагрузки

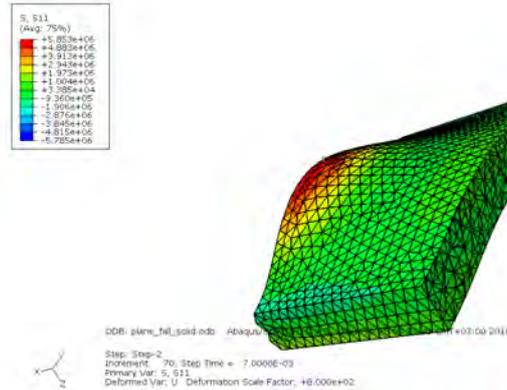


Рисунок 8 - Поля растягивающих напряжений фрагмента стены при динамическом действии нагрузки

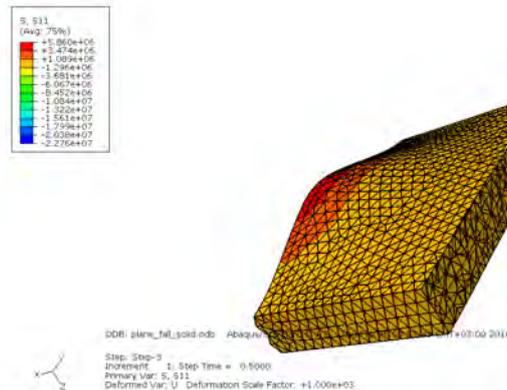


Рисунок 9 Поля растягивающих напряжений фрагмента стены при статическом действии нагрузки

Далее, указанная выше статическая нагрузка прикладывалась к общей модели здания, созданной в среде SCAD, и выполнялся расчет на все виды воздействий.

После расчета напряженно-деформированного состояния строительных конструкций пристройки и результатам РСУ программно получены поля армирования наружных и внутренних стен, фундаментной плиты, плиты покрытия, колонн заглубленной части, фундаментной плиты и перекрытий сооружения.

На рисунках 10 ÷ 13 представлены результаты расчета армирования наружных стен, в виде полей распределения площадей арматуры (площади (см²/пог.м), количество и диаметры (мм) стержней на пог.м с различным шагом).

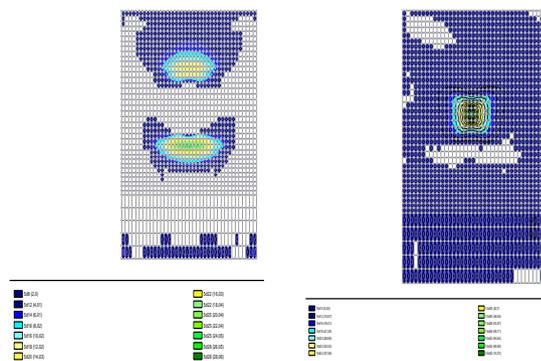


Рисунок 11 – AS4 - верхняя вертикальная арматура вдоль по глобальной оси Z

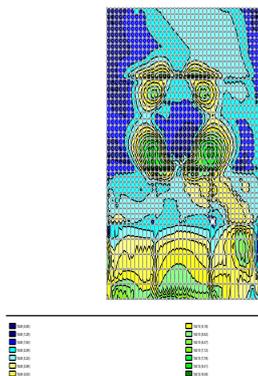


Рисунок 12 - AS1- нижняя горизонтальная арматура вдоль по глобальной оси Y

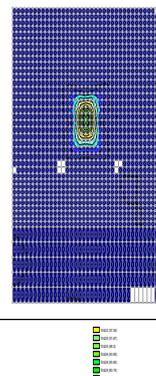


Рисунок 13 - AS2- верхняя горизонтальная арматура вдоль по глобальной оси Y

Рассмотренное здание относится к вновь проектируемому объекту ОИАЭ, потенциальная опасность которого, при аварии на нем может привести к техногенной катастрофе глобального или регионального масштаба (что соответствует 1 категории по ответственности за радиационную и ядерную безопасность и 1 категории по сейсмостойкости), поэтому в расчет были заложены воздействия со следующими параметрами:

- сейсмическое воздействие — МРЗ интенсивностью 7 баллов по шкале MSK-64 с максимальным ускорением колебаний грунта в горизонтальном направлении 0.1g;
- воздействие воздушной ударной волны — с избыточным давлением во фронте волны 10 кПа и продолжительностью фазы сжатия до 1 с;
- падение самолета — весом до 5 тс со скоростью 60÷100 м/с;
- обрушение конструкций балки покрытия здания весом 4.1 т.
- экстремальная ветровая нагрузка — 1.05 кПа;
- экстремальная снеговая нагрузка — 4.8 кПа.
- максимальная нагрузка от смерча — 4.8 кПа.

Предлагаемый метод позволяет на начальном этапе анализа по программе ABAQUS определить статическую нагрузку от наиболее значимого воздействия – падения самолета, внести данное численное значение в общую модель для расчета по ВК «SCAD» и в результате комплексного анализа программно получить расчетную арматуру во всех частях здания при всех нагружениях с учетом расчетных сочетаний усилий.

ЛИТЕРАТУРА

- 1 ПНАЭ Г-1-011-97. Общие положения обеспечения безопасности атомных станций (ОПБ-88/97). – М.: ГАЭН СССР, 1998 г.
- 2 ПиНАЭ-5.6. Нормы строительного проектирования АС с реакторами различного типа / Минатомэнерго СССР. – М., 1986 г.
- 3 СНиП II-11-77*. Защитные сооружения гражданской обороны / Госстрой СССР. – М., 1987 г.
- 4 СНиП 2.01.07-85*. Нагрузки и воздействия / Минстрой России. – М.: ГП ЦПП, 1996 г.
- 5 СНиП 52-01-2003. Бетонные и железобетонные конструкции / Госстрой России. – М.: ГУП «НИИЖБ», ФГУП ЦПП, 2004 г.
- 6 СП 52-101-2003. Бетонные и железобетонные конструкции без предварительного напряжения арматуры / Госстрой России. – М.: ГУП «НИИЖБ», ФГУП ЦПП, 2004 г.
- 7 НП-064-05. Учет внешних воздействий природного и техногенного происхождения на объекты использования атомной энергии.
- 8 Буторин С.Л., Шульман Г.С., Шульман С.Г. Методы анализа безопасности АЭС при авиакатастрофах. – М.: Энергоатомиздат, 2006 г.
- 9 Верификационный отчет программного комплекса ABAQUS. Определение НДС в элементах строительных конструкций АЭС при статических и динамических воздействиях. Расчет спектров ответа. Нововоронежская АЭС-2. Энергоблоки № 1 и 2. – ФГУП «Атомэнергопроект», инв. № 2371 от 16.01.2008 г.
- 10 Верификационный отчет по программе «УДАР». Нововоронежская АЭС-2. Энергоблоки № 1 и 2. – ФГУП «Атомэнергопроект», инв. № 2380 от 16.01.2008 г.
- 11 " Расчет экстремальных климатических характеристик района НИИ Атомных реакторов. Отчет ГГО им. А. Воейкова, Ленинград, 1991 г".