

## К ИСПОЛЬЗОВАНИЮ ПРОГРАММЫ КОНЕЧНО-ЭЛЕМЕНТНОГО АНАЛИЗА FEMAP&NASTRAN В ЗАДАЧАХ РАСЧЕТА И ОПТИМИЗАЦИИ СТРОИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ

Борисевич А. А.

Научные достижения в строительной механике и численных методах решения прикладных задач в сочетании с современными языками программирования послужили основой к созданию целого ряда мощных проектно-вычислительных комплексов для решения разнообразных задач при статических и динамических воздействиях на исследуемые объекты.

Для исследования напряженно-деформированного состояния системы «здание – фундамент – основание» используются ПК SOFiSTiK, SCAD, PLAXIS, ANSYS, модуль APM Structure3D, входящий в систему APN Civil Engineering и другие. ООО «ЕВРОСОФТ» — российское научно-производственное предприятие разрабатывает и поставляет на внутренний и внешний рынок программное и информационное обеспечение для автоматизированного проектирования зданий и сооружений — неотъемлемую часть систем автоматизации проектирования (САПР) в строительстве. Основной разработкой фирмы является система автоматизированного строительного проектирования СТАРКОН. Центральным ядром системы служит программный комплекс STARK ES, предназначенный для решения задач расчета произвольных пространственных конструкций на прочность, устойчивость и колебания с помощью метода конечных элементов.

В настоящей работе акцентировано внимание научных работников и проектировщиков на большие возможности программного продукта Femap&Nastran.

Конечно-элементная модель пространственной рамы, опирающейся на деформируемое основание, показана на рисунке 1. Деформируемое основание имеет размеры в плане 23.6 x 35.6 м, по высоте – 11.2 м. Отметка подошвы фундамента:  $y = 0.0$  м, нижней плоскости основания соответствует отметка  $y = -10.0$  м. Верхняя плоскость каркаса находится на отметке 25.2 м, высота каждого этажа равна 4.8 м.

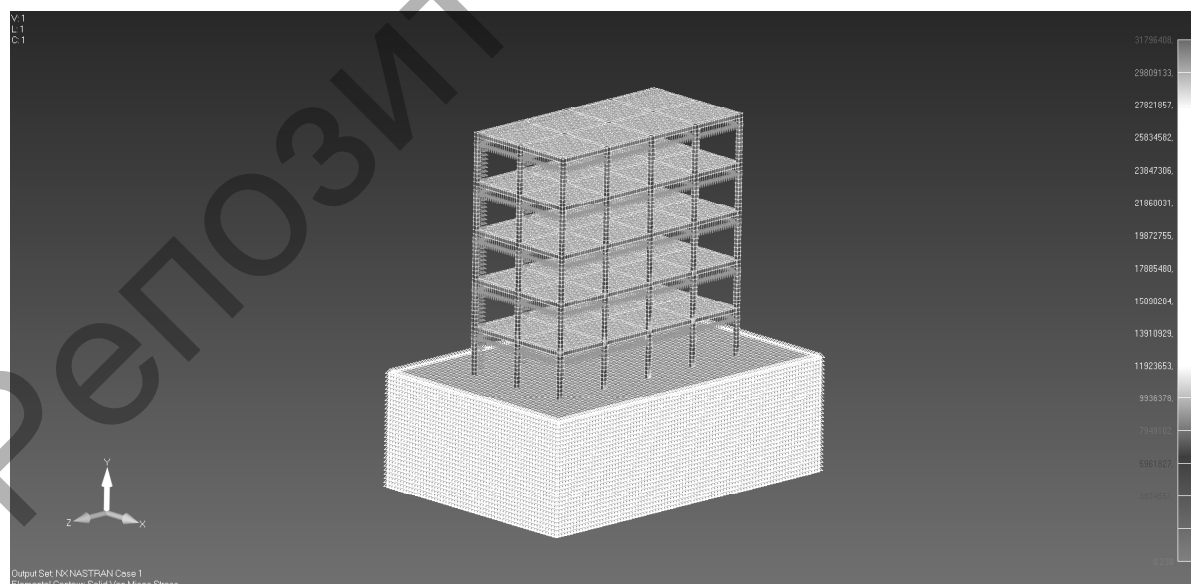


Рисунок 1

Для описания железобетонных элементов этой модели использованы объемные элементы типа Solid (Твердотельный, пространственный элемент; длина КЭ равна 0.3 м) и линейные (одномерный) элементы типа Rod (Стержень) - для моделирования арматуры. Сечение колонн железобетонного каркаса принято размером  $0.4 \times 0.4 \text{ м}^2$  неизменным по высоте пяти-

этажного здания, ригели перекрытий имеют прямоугольное сечение размером  $0.3 \times 0.4 \text{ м}^2$ , толщина плит перекрытия –  $0.2 \text{ м}$ . Для анализа чувствительности напряженно-деформированного состояния (НДС) каркаса к изменению некоторых его параметров приняты следующие характеристики материалов.

Характеристики бетона: модуль упругости  $E=4 \times 10^4 \text{ МПа}$ , расчетное сопротивление на сжатие –  $R = 36 \text{ МПа}$ , коэффициент Пуассона  $\nu = 0.2$ , плотность материала  $\rho = 2500 \text{ кг/ м}^3$ ; модуль сдвига вычисляется по формуле  $G = E/(2*(1+\nu))$ .

Колонны армированы, в тестовом примере продольная арматура размещена по каждому углу сечения колонны (площадь сечения арматуры в одном углу равна  $0.00282743 \text{ м}^2$ , что соответствует площади четырех стержней диаметром  $0.03 \text{ м}$ ); поперечная арматура на модели отсутствует. Ригели имеют нижнюю и верхнюю рабочую арматуру (площадь сечения каждой соответствует площади четырех стержней диаметром  $0.03 \text{ м}$ ).

Характеристики арматуры: модуль упругости  $E=2 \times 10^5 \text{ МПа}$ , расчетное сопротивление на сжатие –  $R = 400 \text{ МПа}$ , коэффициент Пуассона  $\nu = 0.3$ , плотность материала  $\rho = 7850 \text{ кг/ м}^3$ ; модуль сдвига вычисляется по формуле  $G = E/(2*(1+\nu))$ .

Материал основания рамы имеет характеристики: модуль упругости  $E=16 \text{ МПа}$ , коэффициент Пуассона  $\nu = 0.3$ , плотность материала  $\rho = 1760 \text{ кг/ м}^3$ ; модуль сдвига вычисляется по формуле  $G = E/(2*(1+\nu))$ .

Внешняя вертикальная нагрузка на узлы ригелей по всем этажам принята равной  $3 \text{ кН}$ , на узлы ригелей перекрытия –  $1.5 \text{ кН}$ . Горизонтальная нагрузка направлена вдоль оси X (вдоль меньшего размера в плане каркаса), нагрузка на узел равна  $0.5 \text{ кН}$ , приложена ко всем узлам на плоскости XY.

Приведем некоторые результаты статического расчета.

Для рамы на грунтовом основании максимальное вертикальное перемещение под подошвой фундамента (на отметке  $y = 0.0$ ) равно  $-0.0264 \text{ м}$ ; для узла, расположенного на покрытии каркаса –  $-0.02986 \text{ м}$  (узел 36718); максимальное горизонтальное перемещение узла покрытия равно  $0.00619 \text{ м}$ .

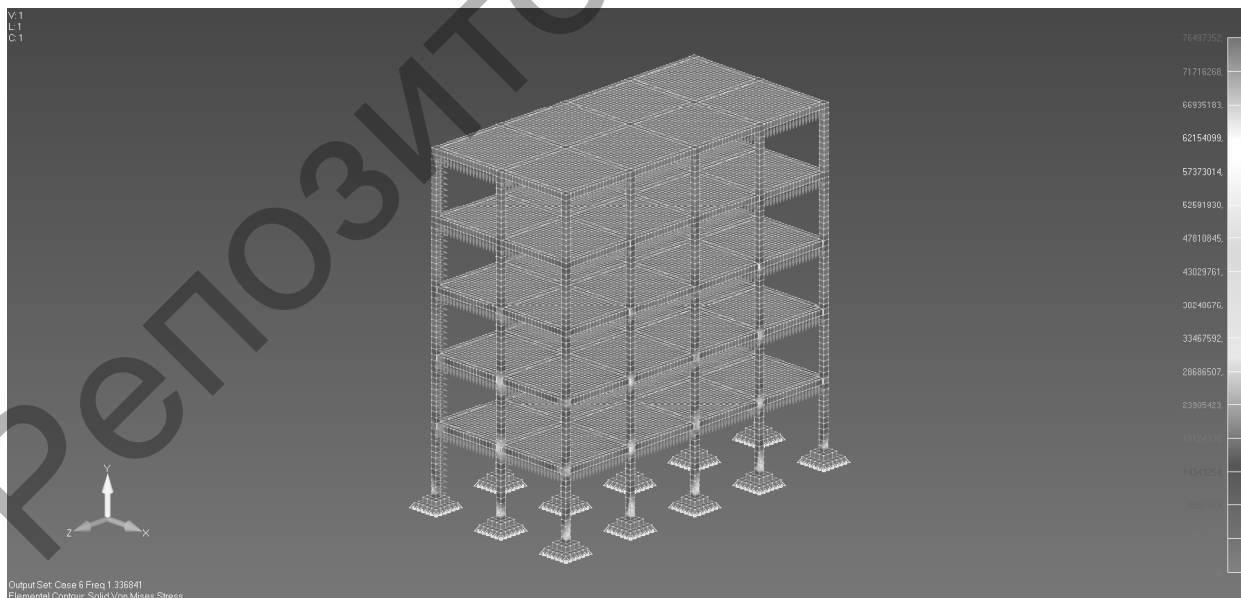


Рисунок 2

Максимальные эквивалентные напряжения по гипотезе энергии формоизменения (Solid Von Mises Stress) наблюдались в КЭ колонны первого этажа ( $\sigma_{\text{эв}} = 8,197 \text{ МПа}$ ), соответствующее напряжение в грунте под подошвой фундамента оказалось равным  $128.9 \text{ кН/м}^2$ . Минимальное напряжение в стержне арматуры колонны равно  $-76.58 \text{ МПа}$ , максимальное –

(+45.195МПа). Для той же рамы, расположенной на неподатливом основании, максимальные эквивалентные напряжения в КЭ колонны равны  $\sigma_{\text{эв}} = 8,609$  МПа; минимальное напряжение в стержне арматуры колонны равно -77.2 МПа, максимальное – (+17.77 МПа).

Принятая для исследования конечно-элементная модель пространственной рамы является многопараметрической. Переменными проектирования (ПП) в настоящей модели являются форма и размеры поперечных сечений колонн и ригелей, площадь арматуры колонн и ригелей (верхняя и нижняя арматура), механические характеристики материалов. Можно учесть и множество других особенностей. Аналитическое решение задачи о поиске оптимального проекта для такой сложной задачи практически невозможно. Исследуя чувствительность показателя эффективности проекта к изменению каждого параметра можно, учитывая приоритетность ПП, организовать направленный поиск оптимального проекта.

Покажем далее особенности расчета каркаса, расположенного на неподатливом основании, на действие динамической нагрузки и выполним анализ полученных результатов расчета.

Для каркаса, расположенного на неподатливом основании, получен спектр собственных частот: [1.315, 1.337, 1.499, 4.068, 4.128, 4.658, 7.167, 7.255, 8.230, 10.347] Hz. В дальнейшем сравним их с частотами для каркаса, расположенного на грунтовом основании.

Гармоническая нагрузка на ригели первого этажа (отметка  $Y = 6.0$  м) по осям элементов с координатами  $X = 0.0$  м,  $X = 6.0$  м и  $X = 12.0$  м приложена в узлах КЭ (по обе стороны элементов) с координатами  $Z = 8.1$  м и  $Z = 9.9$  м (рисунок 1). Амплитудное значение нагрузки на узлы равнялось 50 кН (при  $X = 0.0$  м и  $X = 12.0$  м) и 100 кН (при  $X = 6.0$  м).

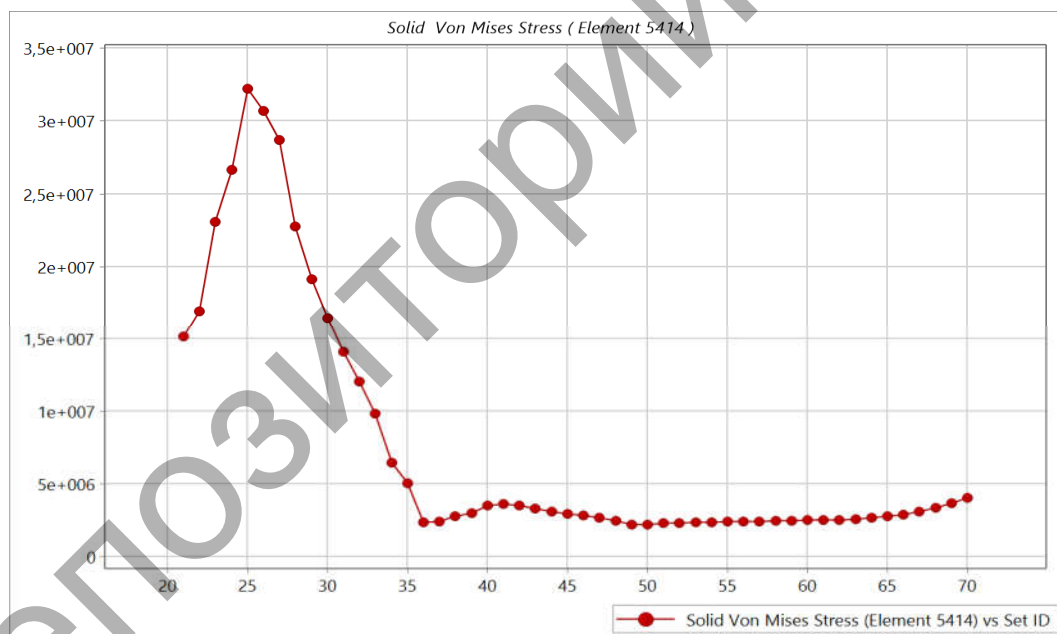


Рисунок 3

Максимальные эквивалентные напряжения по гипотезе энергии формоизменения (Solid Von Mises Stress) наблюдались в КЭ 5414 (колонна первого этажа, привязка к узлу 4625 с координатами (6.2, 6.0, 23.8)) при частоте 1.315 Hz ( $\sigma_{\text{эв}} = 32.2$  МПа). На рисунке 3 показан график изменения напряжения в этом элементе в зависимости от исследуемого случая динамической нагрузки. Этому же графику соответствует график на рисунке 4, на котором по горизонтали показаны значения частот.

Максимальные эквивалентные напряжения в арматуре колонны при динамической нагрузке равны 306,1 МПа (стержень соединяет узлы 41355 (5.8, 0.8, 18.2) и 4527 (5.8, 1.2, 18.2)) возникают при частоте 1.315 Hz.

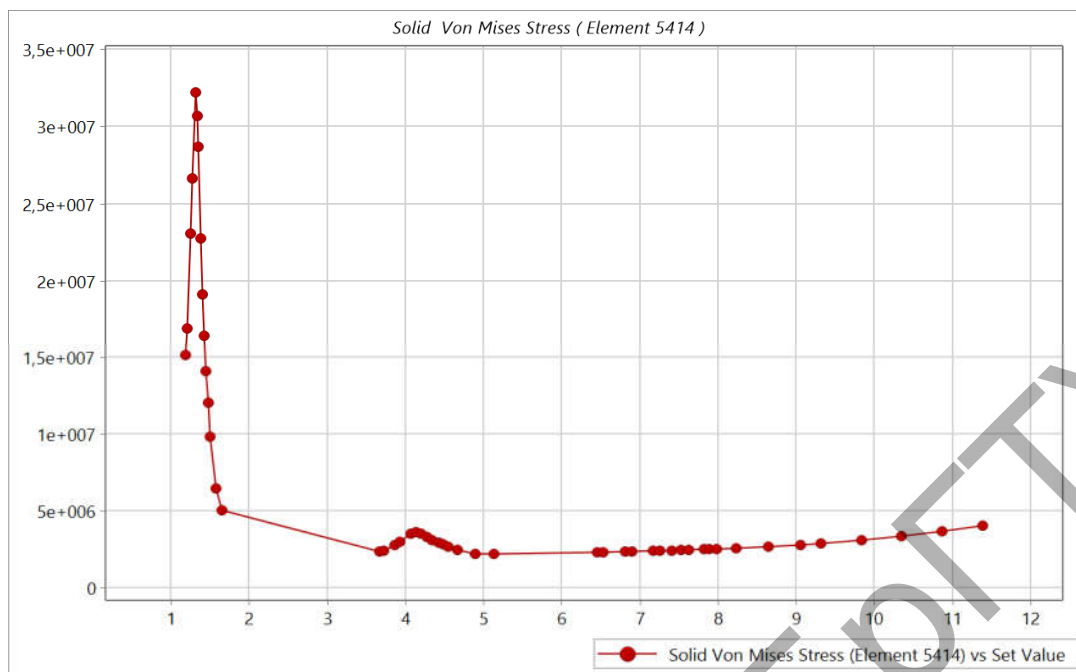


Рисунок 4

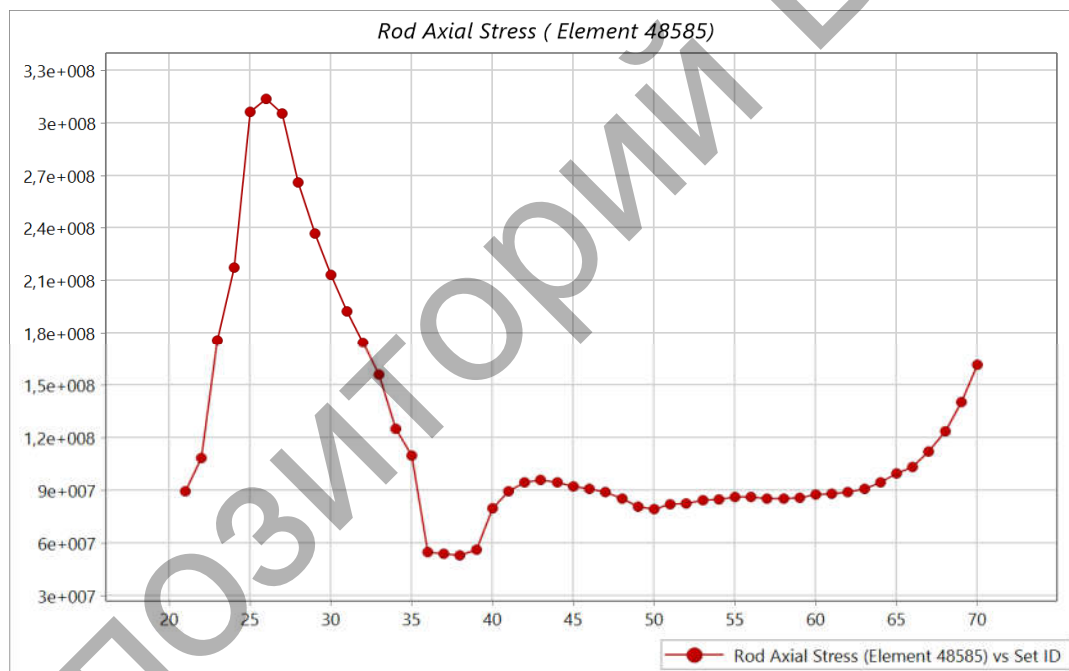


Рисунок 5

Максимальное горизонтальное перемещение узла равно 0.1 м (узел 37059,  $y = 25.2$  м).

Выполнить аналогичные исследования для каркаса, расположенного на грунтовом основании, автору не удалось. Для решения задачи требуется высокая производительность компьютера.

Собственные частоты каркаса, расположенного на грунтовом основании, вычислены. Спектр собственных частот следующий: [0.883, 0.998, 1.972, 2.246, 2.401, 2.500, 2.794, 2.849, 3.158, 3.310] Hz. Упругое основание является, в определенной мере, гасителем колебаний.

#### Список источников

1. Борисевич А. А. Строительная механика: учебное пособие для вузов/А. А. Борисевич, Е. М. Сидорович, В. И. Игнатюк. — Минск: БНТУ, 2009. — 756 с.
2. Шимкович Д.Г. Femap & Nastran. Инженерный анализ методом конечных элементов — М.: ДМК Пресс, 2012. — 702 с., ил. (Серия «Проектирование»).