



**Проф. Александр Белостоцкий, в сотрудничестве с проф. Сергеем Дубинским,
аспирант Сергей Петряшев, аспирант Николай Петряшев**

***Числовой анализ напряжённно-деформированного состояния,
динамики, прочности и надёжности несущей способности
бетонных конструкций градирен атомной электростанции***

*Московский государственный строительный университет
(МГСУ)*



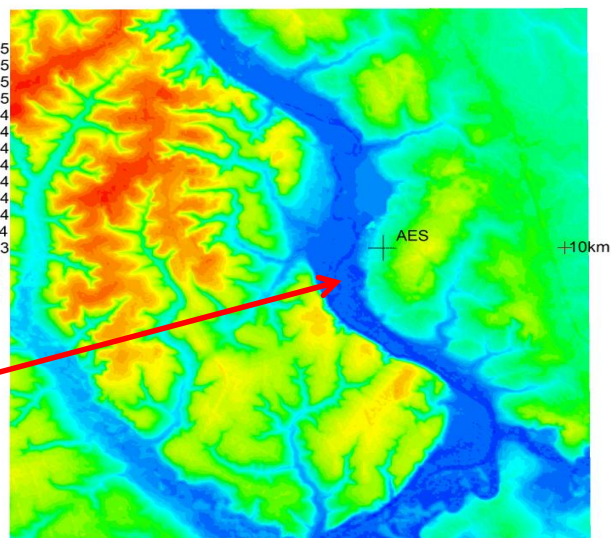
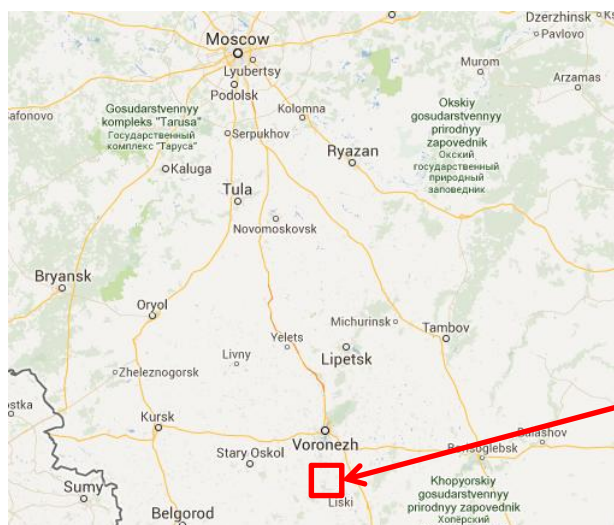


Этапы расчетных исследований

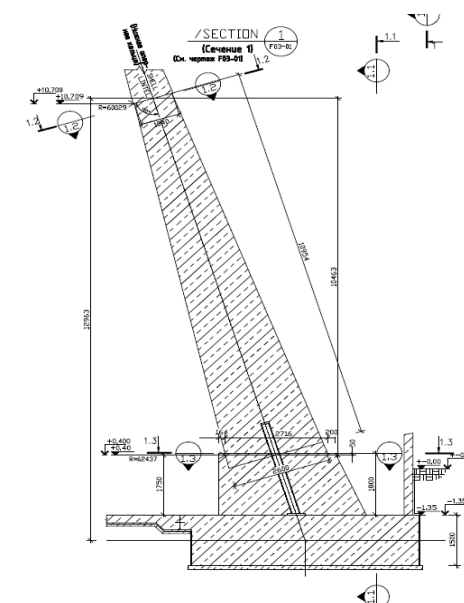
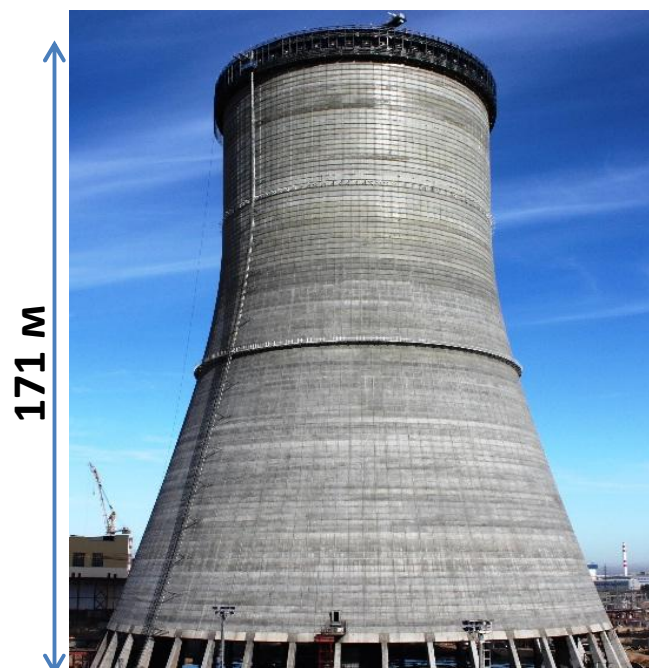
- Обработка и обобщение исходных данных
- Реализация и верификация методики расчета основных и особых (экстремальных) ветровых нагрузок и воздействий на основе CFD (специальный доклад)
- Разработка численных CFD моделей. Граничные условия (профили ветра и т.п), выбор моделей турбулентности и параметров расчета.
- Стационарные и нестационарные расчеты
 - Оценка эквивалентной шероховатости оболочки градирни
 - Определение ветровых нагрузок при нормативном ветре
 - Определение ветровых нагрузок при ураганном ветре
 - Определение ветровых нагрузок при воздействии торнадо (четыре сценария)
- Передача давлений (средняя и пульсационная составляющие) для основных и особых (экстремальных) ветровых нагрузок в ANSYS Mechanical
- Разработка и верификация пространственных оболочечных и объемных конечно-элементных моделей комбинированной системы “грунтовое основание – ж/б конструкции градирни”
- По разработанным КЭ-моделям в верифицированном ПК ANSYS Mechanical определены параметры напряженно-деформированного состояния несущих конструкций (перемещения, усилия, напряжения) при расчетных сочетаниях нагрузок и воздействий
- Подбор необходимого армирования и оценка прочности (ОМ СНИП Железобетон).
- Определение динамических характеристик в ПК ANSYS Mechanical
- Определение критических нагрузок/форм потери устойчивости в ПК ANSYS Mechanical



Описание конструкции



Карта высот в окрестности НВ АЭС-2 по данным космического зондирования SRTM3

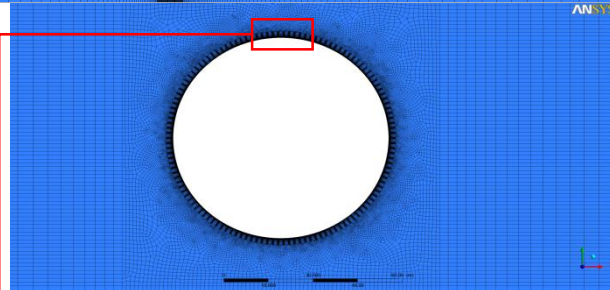
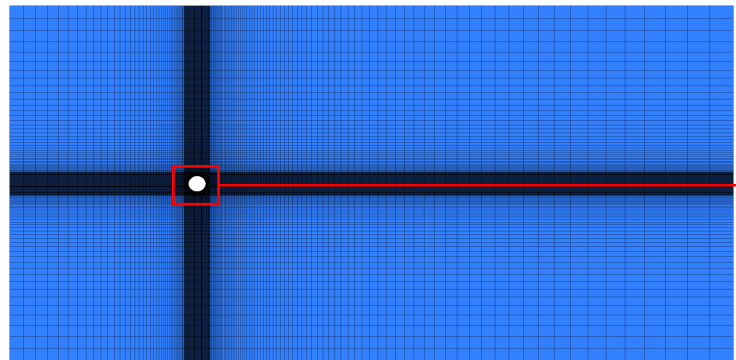


Конструкция колоннады

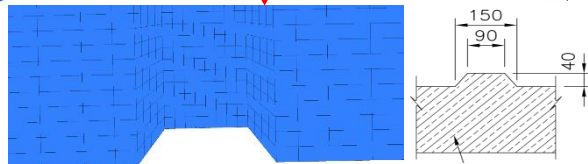
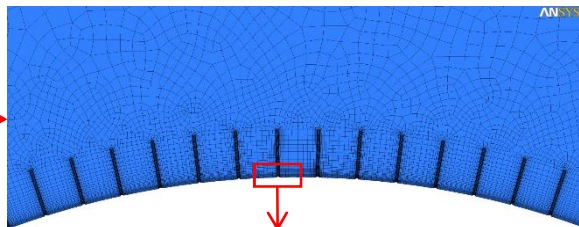
Сентябрь 2013



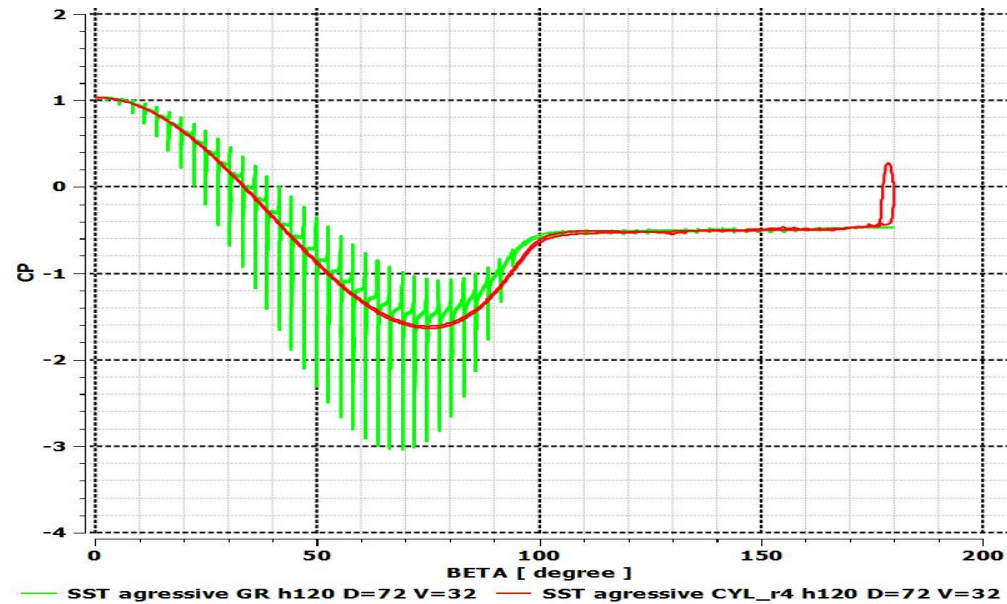
Ветровая аэродинамика. Подбор эквивалентной шероховатости поверхности градирен. *ПК ANSYS CFD*



Расчетная сетка (400 тыс. ячеек). Общий вид



Цилиндр с ребрами (высота ребра 0.04 м).
Расчетная сетка в призматическом пограничном слое. Размер первого элемента $1.8 \cdot 10^{-3}$ м



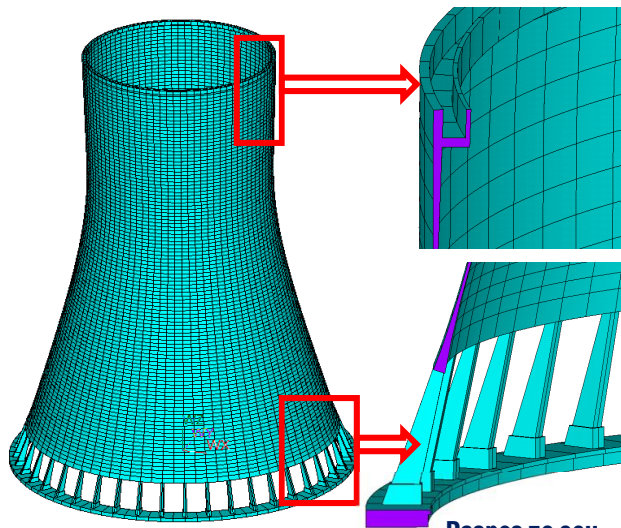
Эпюры средних C_p от угловой координаты :
с заданной шероховатостью – красная линия,
с замоделированными ребрами – зеленая линия.

Расчеты проводились для трех моделей:
а) гладкий цилиндр, б) цилиндр с задаваемой “шероховатостью” на внешней поверхности, в) “реальное” сечение градири с учетом формы ребер.

При подобранной эквивалентной шероховатости (0.04 м) результаты для цилиндра и для модели, точно воспроизводящей геометрию ребер, весьма близки (отличие не превышает 10%)

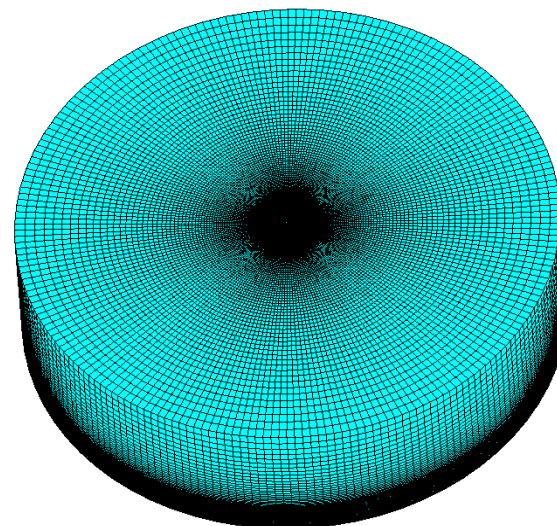


Ветровая аэродинамика. Разработка расчетной модели. *ПК ANSYS CFD*

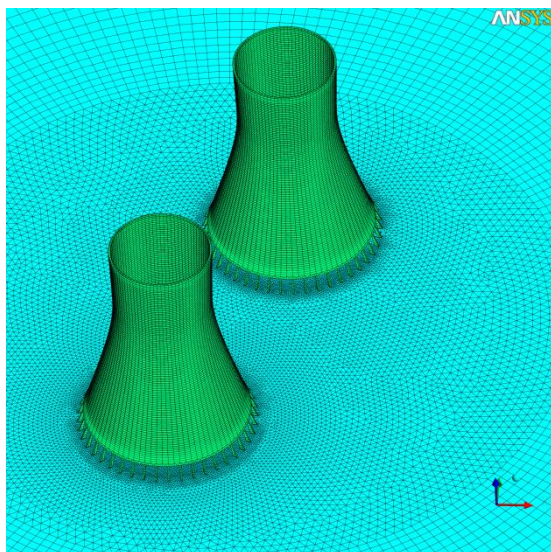


Геометрическая модель

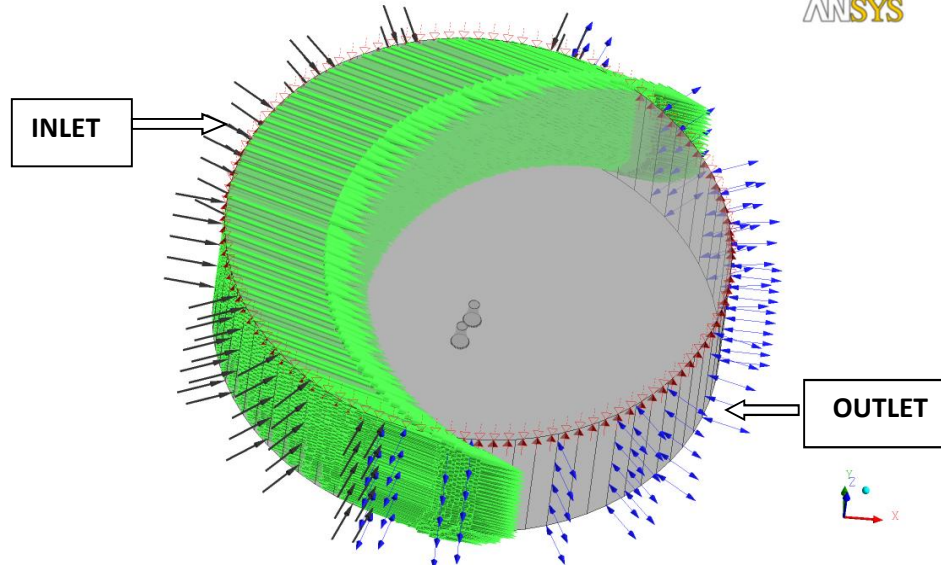
Разрез по оси симметрии



Расчетная область (модель 5.28 млн. ячеек)



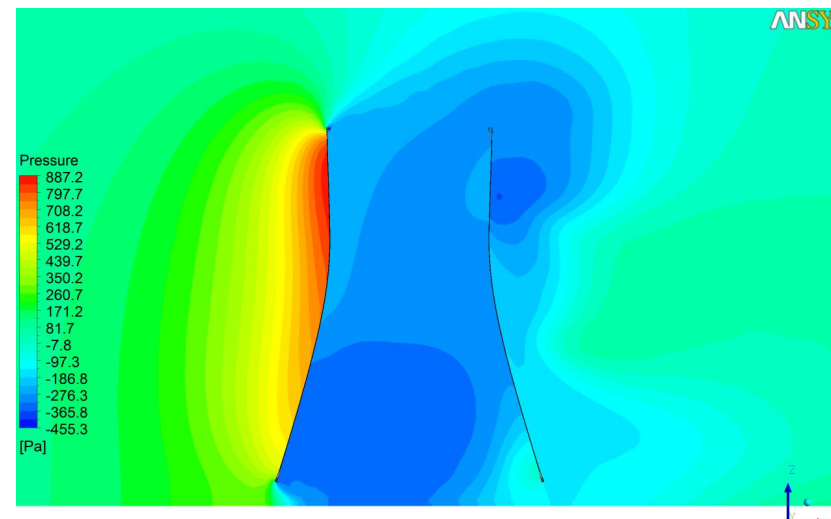
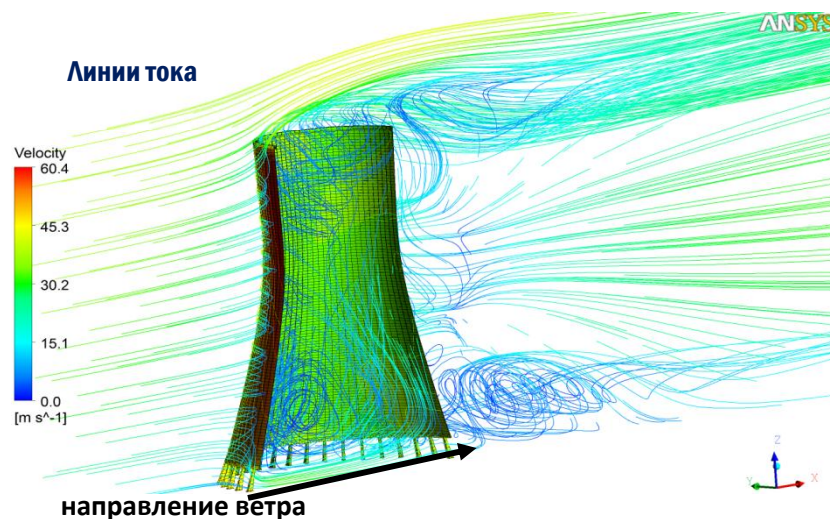
Поверхностная сетка на градирнях (модель с 5.28 млн. ячеек)



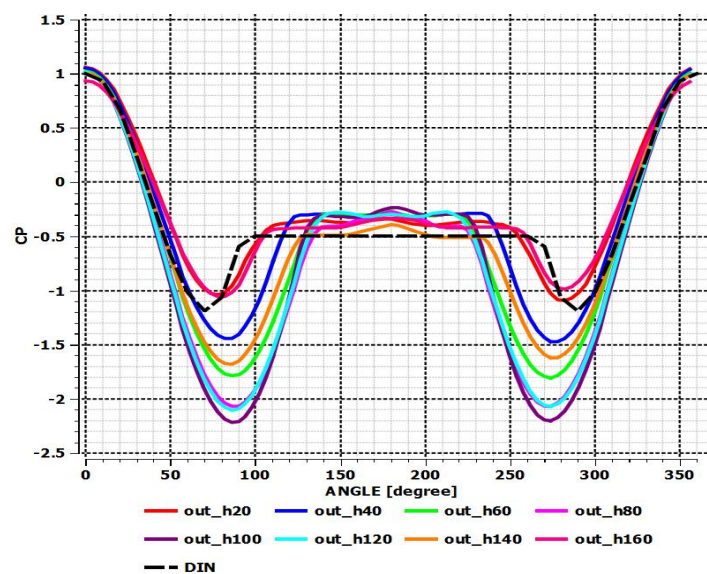
Расчетная область с обозначенными граничными условиями.
Угол атаки ветра 0°



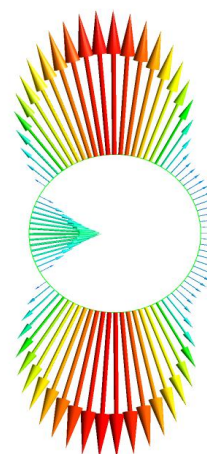
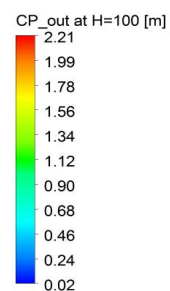
Ветровая аэродинамика. Результаты стационарного расчета. ПК ANSYS CFD



Среднее давление ветра в плоскости симметрии XZ, от -455 Па до 887 Па.
Стационарная постановка



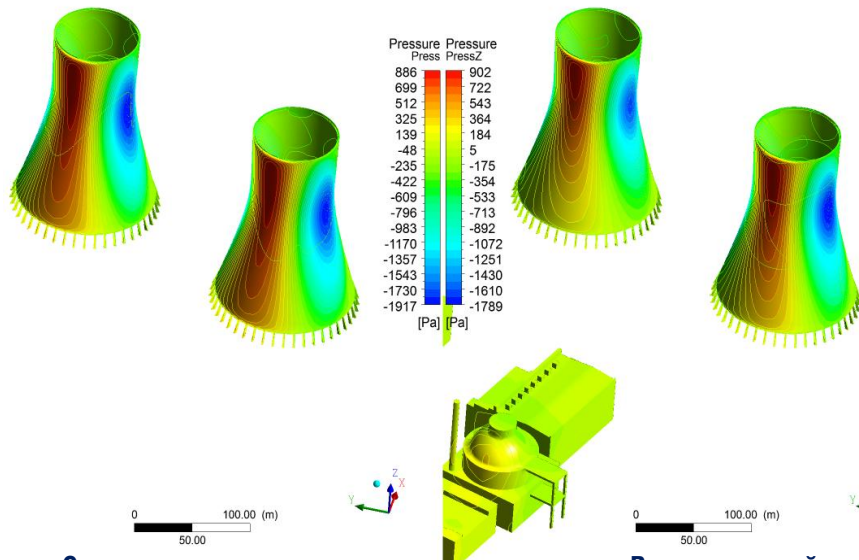
Аэродинамический коэффициент давления C_p на внешней поверхности градирни (out) на разных высотах (от 20 м до 160 м)
Вертикальная ось – значение C_p , горизонтальная ось – угловая координата, α



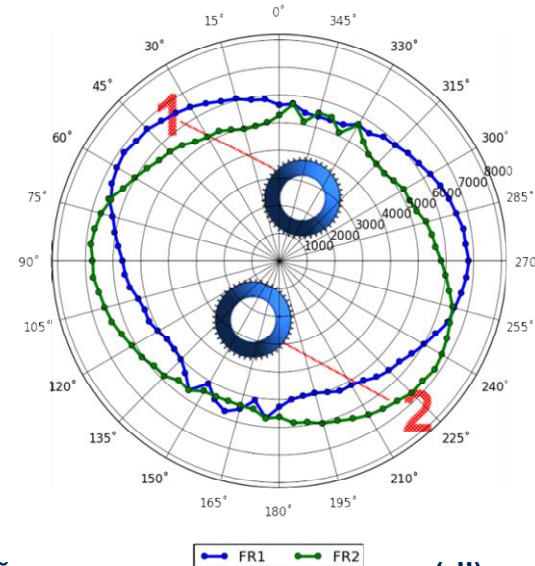
Эпюра аэродинамического коэффициента давления C_p на внешней и внутренней поверхностях градирни на высоте 100 м



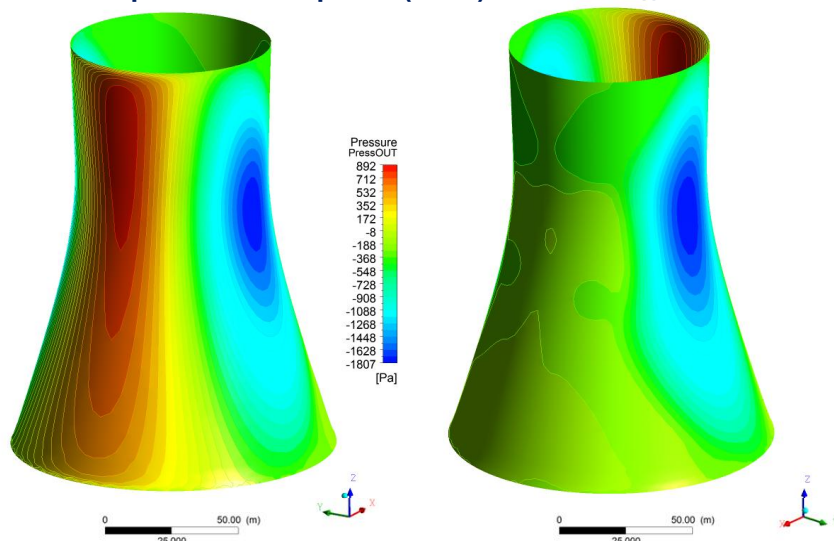
Ветровая аэродинамика. Результаты стационарного расчета. *ПК ANSYS CFD*



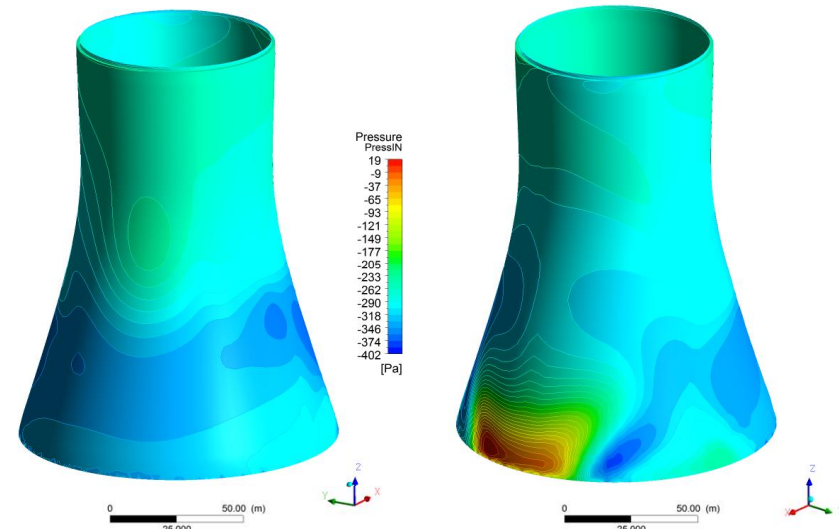
Среднее давление ветра на поверхности градирен. Влияние застройки
Расчет с "застройкой" (справа) – от -1789 Па до 902 Па,
расчет без "застройки" (слева) – от -1917 Па до 886 Па



Равнодействующие средних ветровых нагрузок (кН) в зависимости от угла
направления ветра (градусы) на градирни. Стационарная постановка. Синяя
линия (FR1) – на градирню №1, зеленая линия (FR2) – на градирню №2



Среднее давление ветра на внешней поверхности изолированной градирни



Среднее давление ветра на внутренней поверхности изолированной градирни



Изолированная градирня. Расчет на воздействие смерча. *ПК ANSYS CFD*

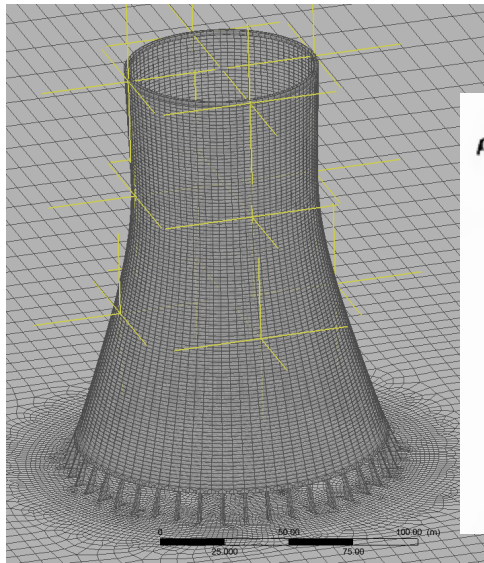
Класс смерча по Фудзита 3,16 согласно ТЗ

Тангенциальная составляющая скорости

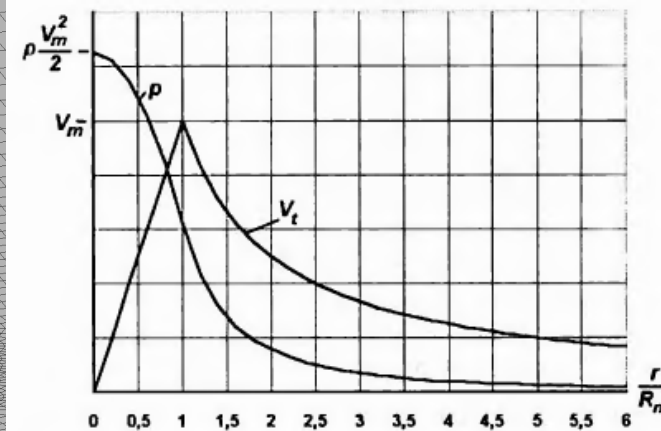
$$V_{\tau} = \begin{cases} \frac{r}{R_m} V_m, & 0 \leq r \leq R_m \\ \frac{R_m}{r} V_m, & R_m \leq r < \infty \end{cases}$$

Давления разряжения

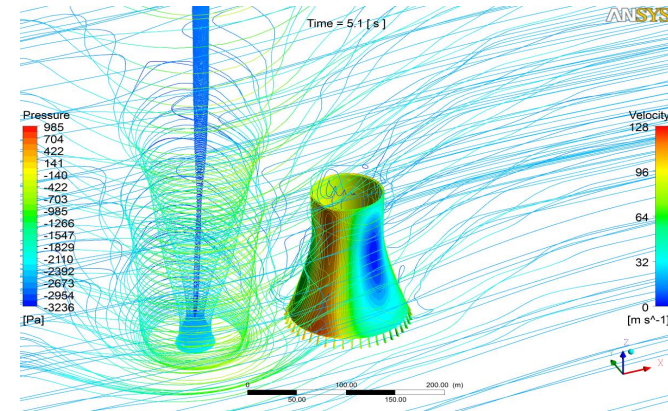
$$p = \begin{cases} \rho \frac{V_m^2}{2} \left(2 - \frac{r^2}{R_m^2} \right) & (0 \leq r \leq R_m) \\ \rho \frac{V_m^2 R_m^2}{2 r^2} & (R_m \leq r \leq \infty) \end{cases}$$



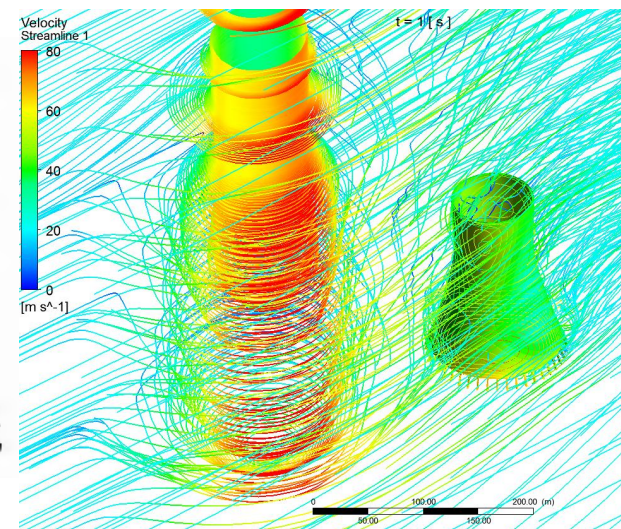
Точки мониторинга



Изменение тангенциальной скорости и давления для вихря Ренкина



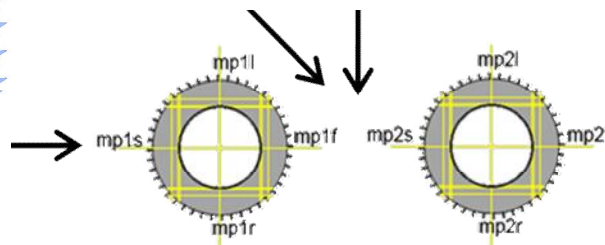
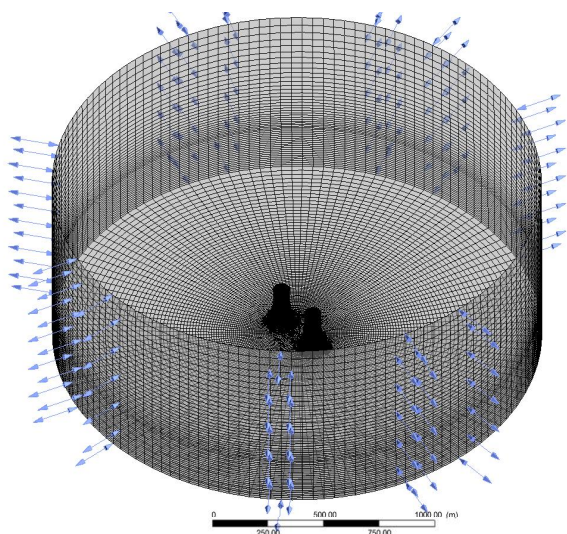
Линии тока и скорости ветра в окрестности градирни для момента времени T=5,1 с



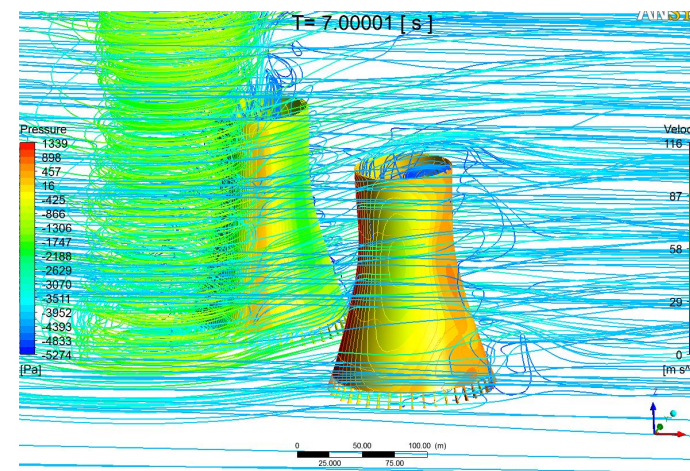
Линии тока и скорости ветра в окрестности градирни для момента времени T=1с (расстояние от “стенки” смерча до стенки градирни примерно 180 м)



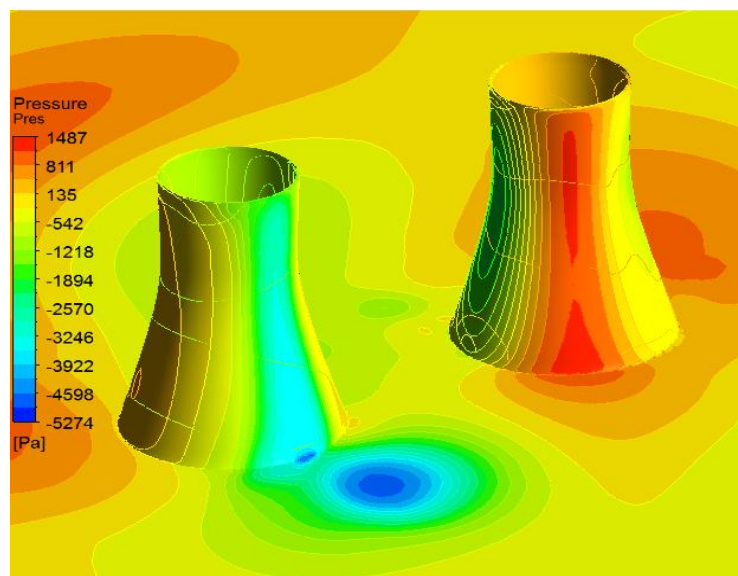
Две градирни. Расчет на воздействие смерча. *ПК ANSYS CFD*



Расчетные сценарии

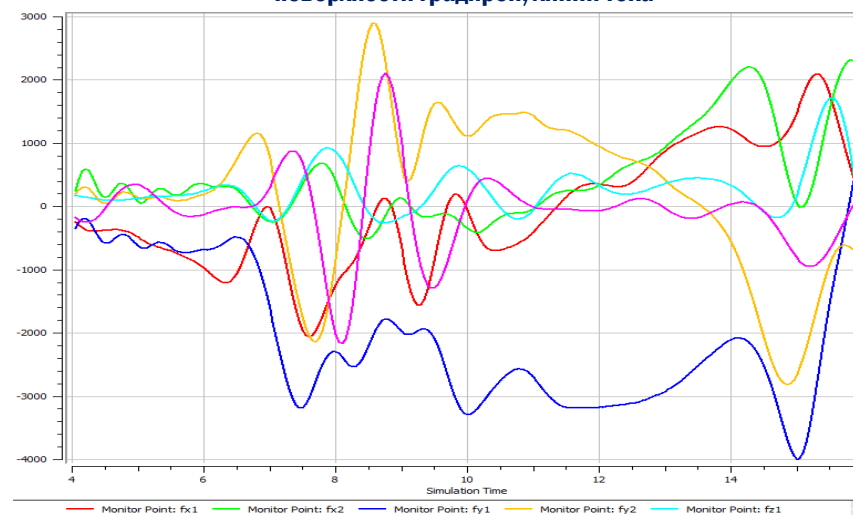


Расчетная область (модель 1.8 млн. ячеек)



Момент времени 7 секунд после начала движения. Давление (Па) на поверхности градирен и на плоскости $z=10$ м

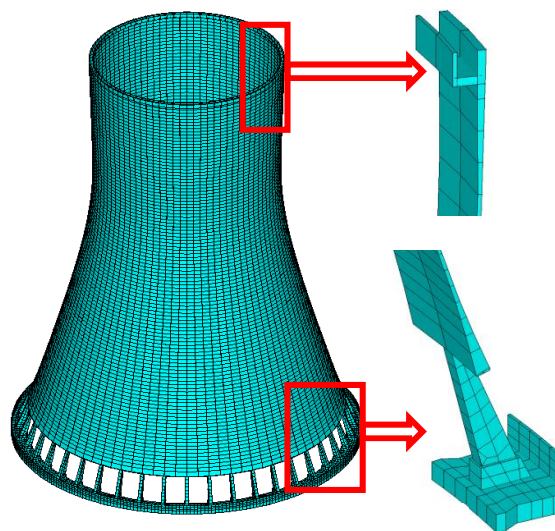
Момент времени 7 секунд после начала движения. Давления (Па) на поверхности градирен, линии тока



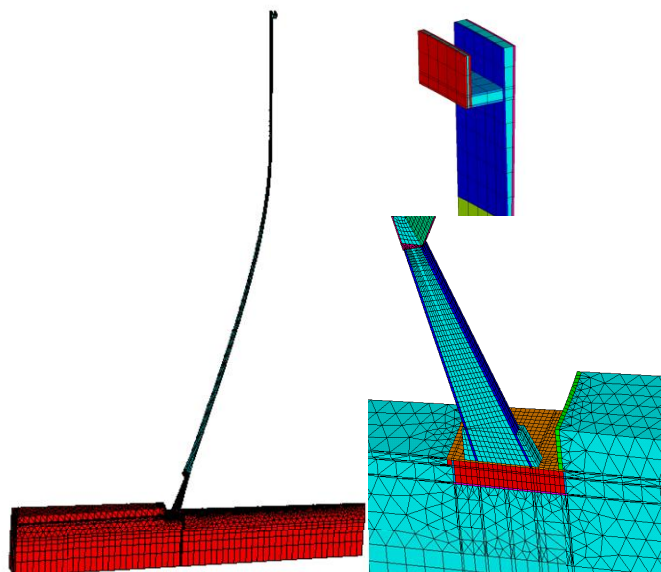
Суммарные нагрузки (тс) Fx и Fy на 1 и 2 градирню от торнадо во времени (сек)



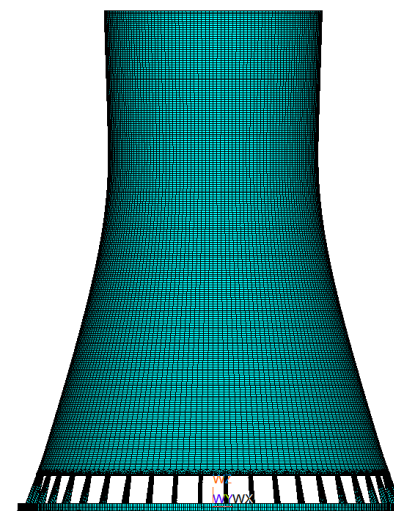
Расчетное определение НДС, прочности и устойчивости конструкции градирен.
Разработка расчетной модели. *ПК ANSYS Mechanical*



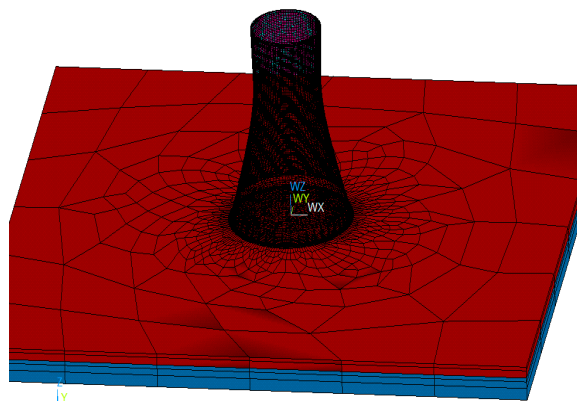
Оболочечная КЭ модель
14 тыс. узлов



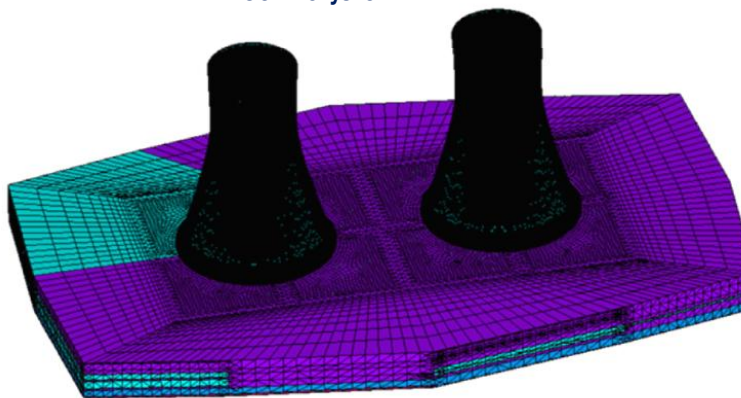
Объемная КЭ модель сектора 1/88
часть с грунтовым основанием
36 тыс. узлов



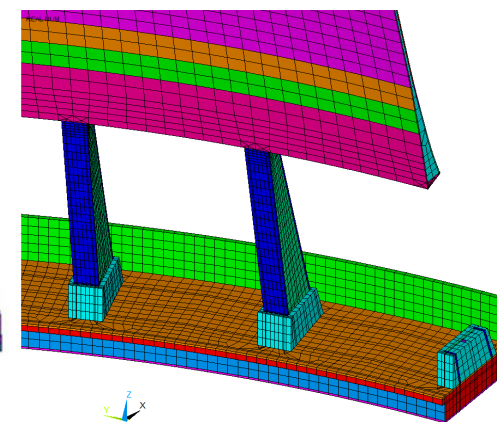
Объемная КЭ модель
724 тыс. узлов



упрощенная комбинированная
КЭ-модель системы “динамическое грунтовое
основание (объемная) – градирня
(оболочечная)” в контактной постановке
35 тыс. узлов



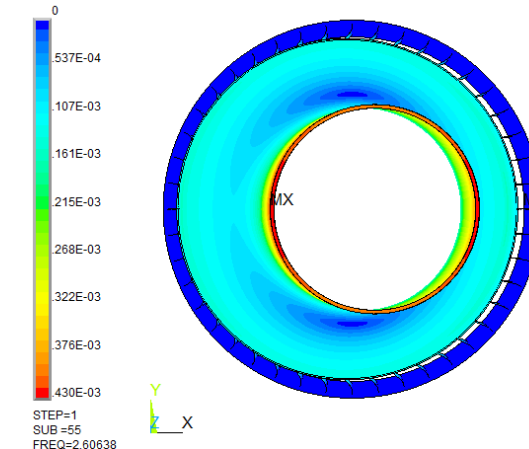
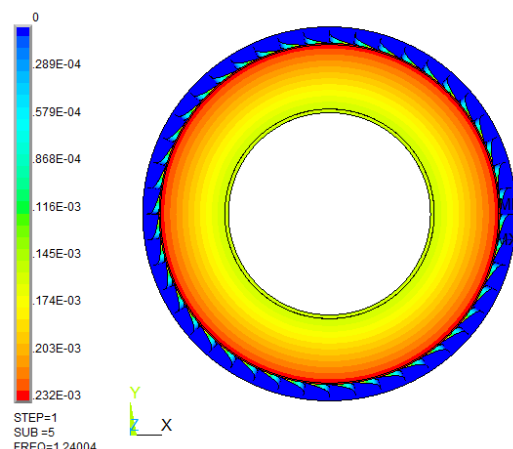
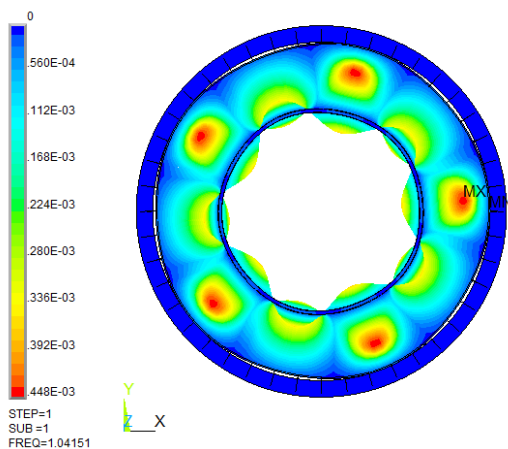
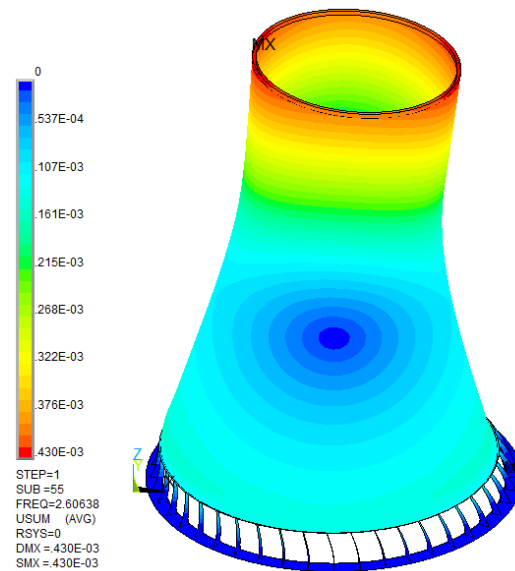
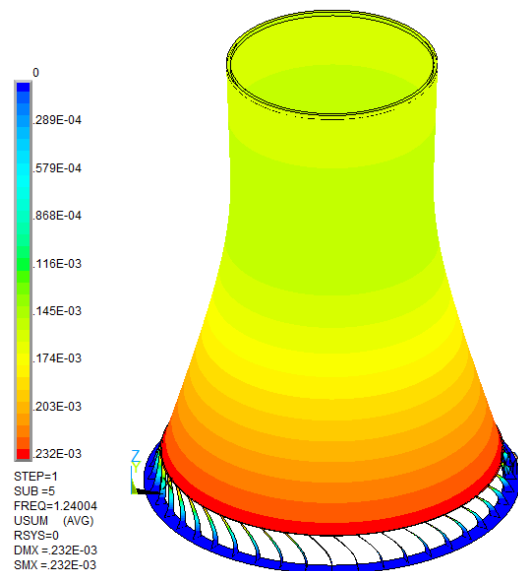
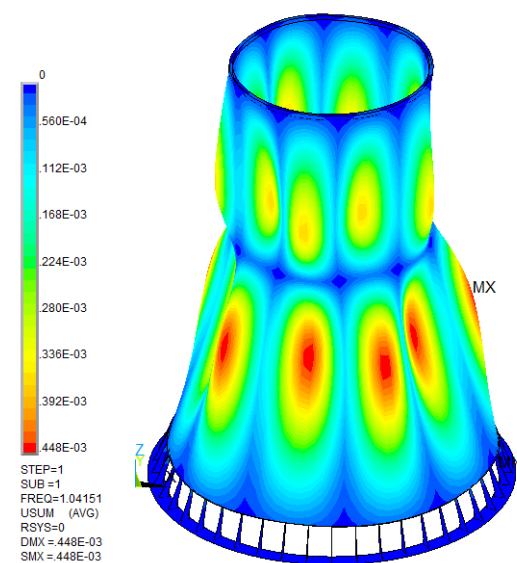
объемная КЭ-модель системы
“грунтовое основание–градирни”
1310 тыс. узлов



объемная КЭ-модель для расчета на
аварийную ситуацию
49 тыс. узлов



Расчетное определение НДС, прочности и устойчивости конструкции градирен.
Результаты модального анализа. *ПК ANSYS Mechanical*



Оболочечная модель градирни (на жестком основании)

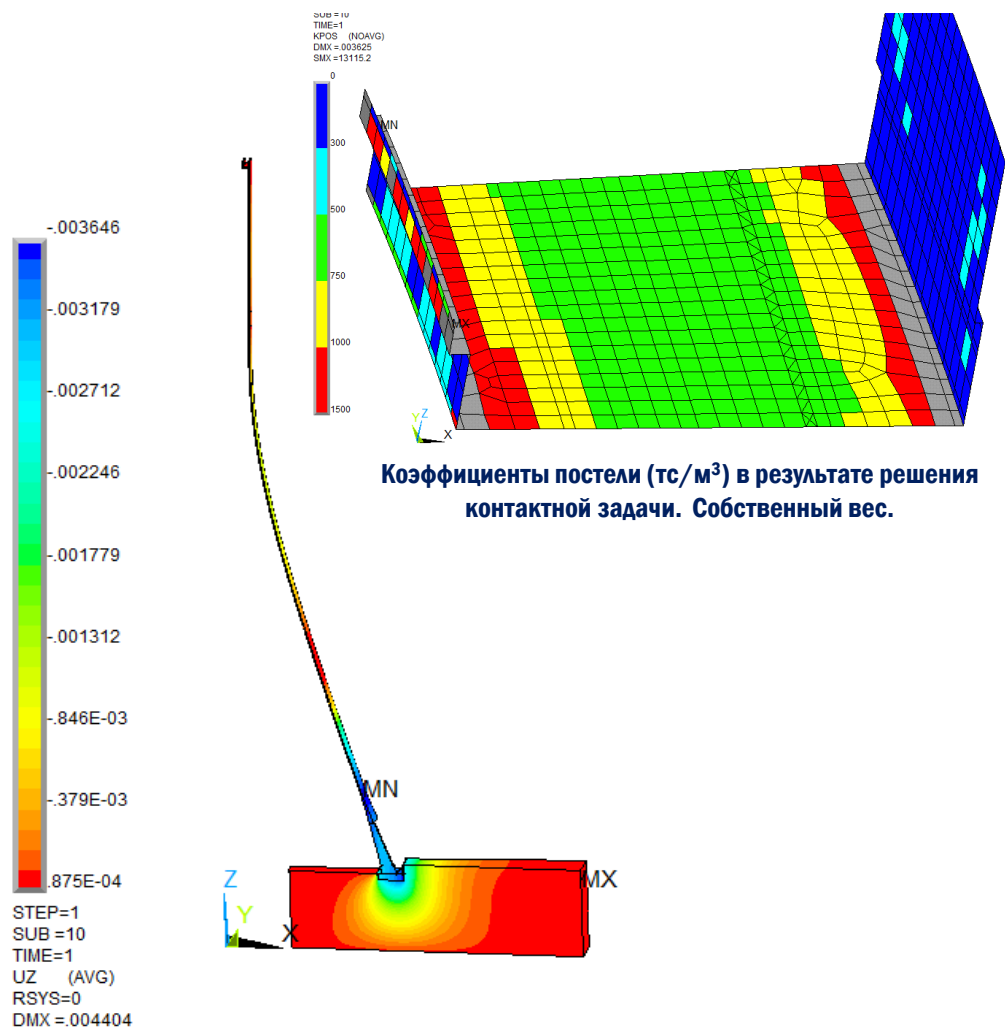
1-я собственная форма колебаний (5 волн по окружности), $f = 1.0415$ Гц.

5-я собственная форма колебания (вращение оболочки на колоннах), $f = 1.2400$ Гц.

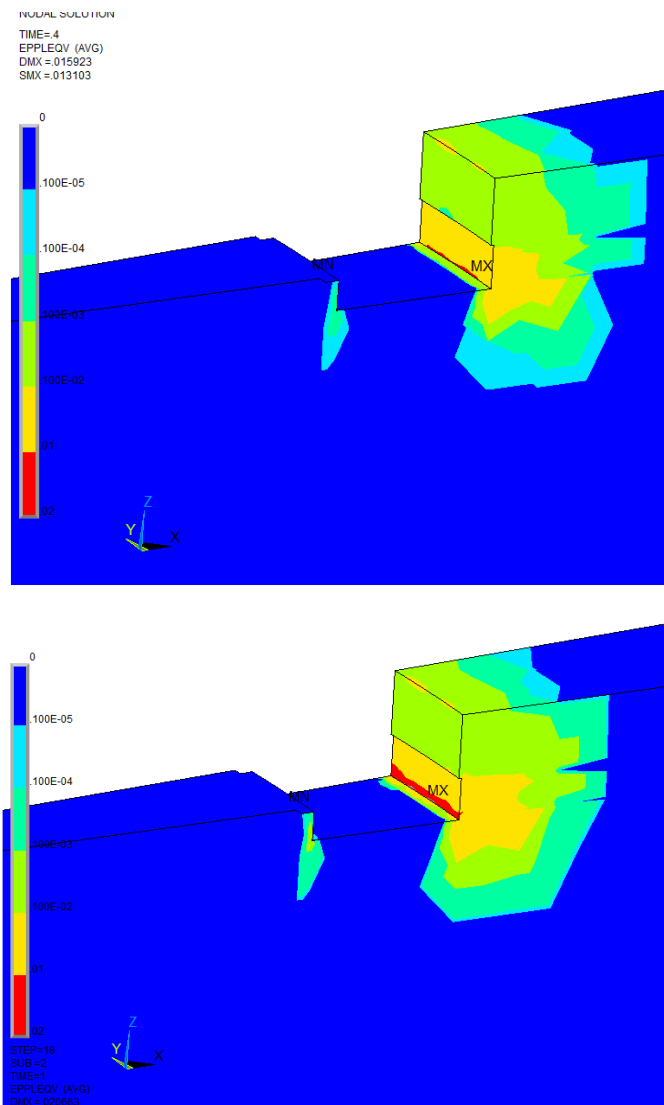
Сейсмически значимые кратные 54-я и 55-я собственные формы колебания, $f = 2.6064$ Гц.



Расчетное определение НДС, прочности и устойчивости конструкции градирен.
Определение эффективных коэффициентов постели. *ПК ANSYS Mechanical*



Вертикальные (м) перемещения в модели. Максимальное значение $0.875 \cdot 10^{-4}$ м, минимальное – -0.003646 м. . Собственный вес



Пластические деформации в грунтах при 40% (сверху) и 100% (снизу) возведении, сцепление 1 кПа. Собственный вес.



Расчетное определение НДС, прочности и устойчивости конструкции градирен.

Нелинейный расчет на воздействие смерча. *ПК ANSYS Mechanical*

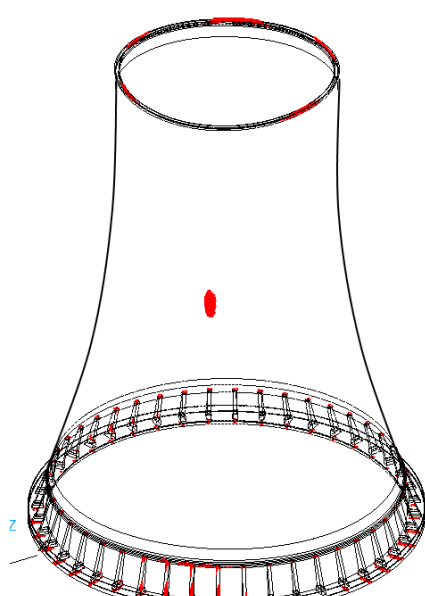
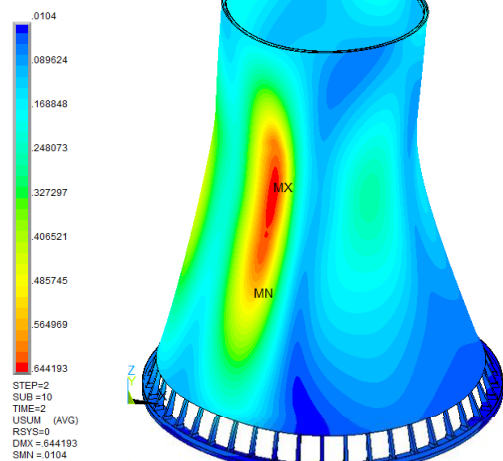


Схема трещинообразования (первые трещины). 60% нагрузки от торнадо



Суммарные перемещения,
максимальное значение 0.64 м

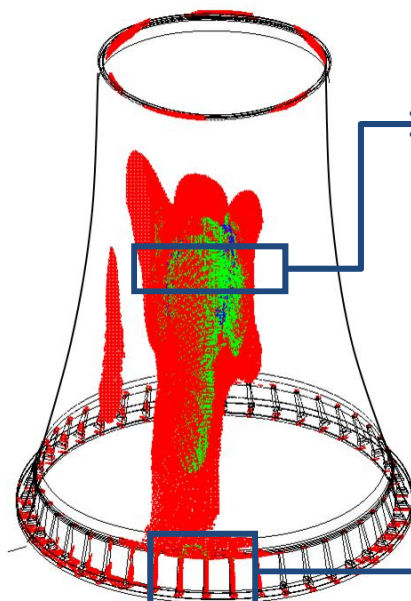


Схема трещинообразования
100% нагрузки от торнадо

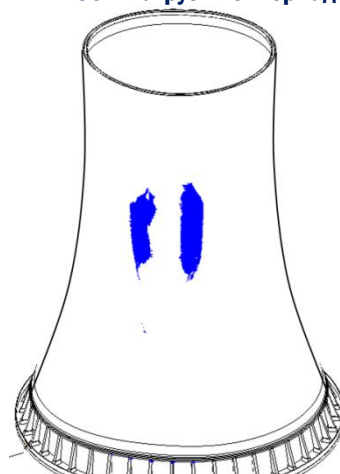


Схема разрушения
100% нагрузки от торнадо

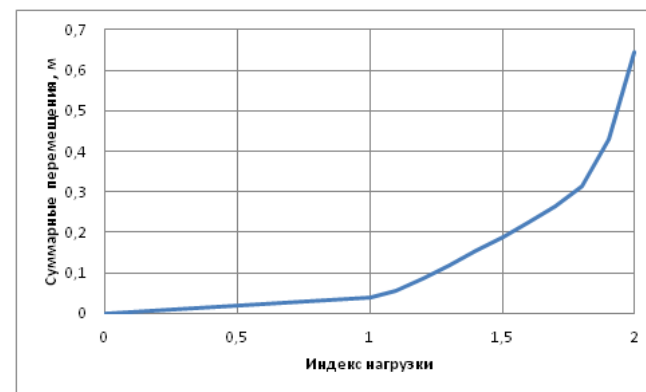
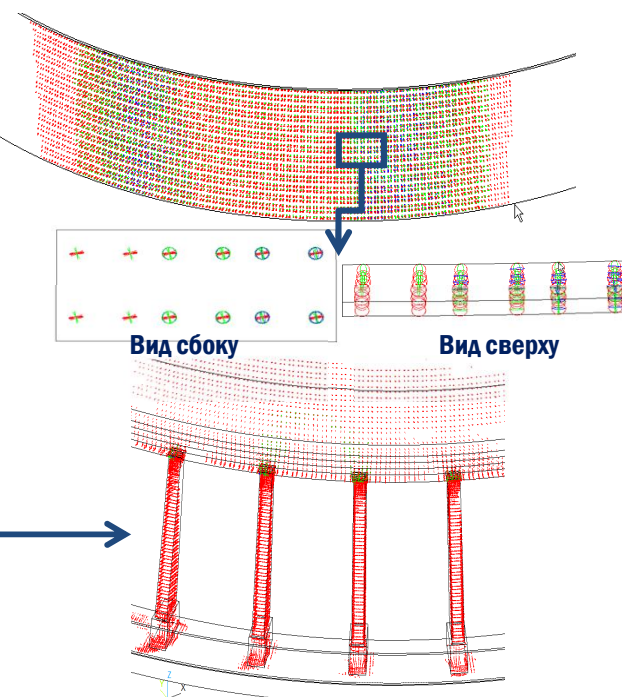
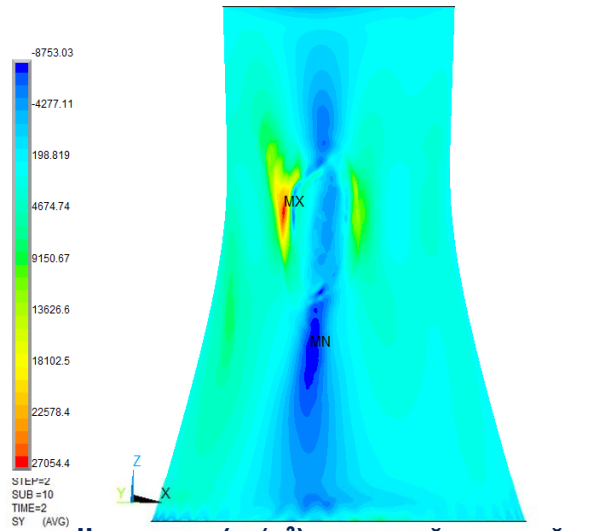


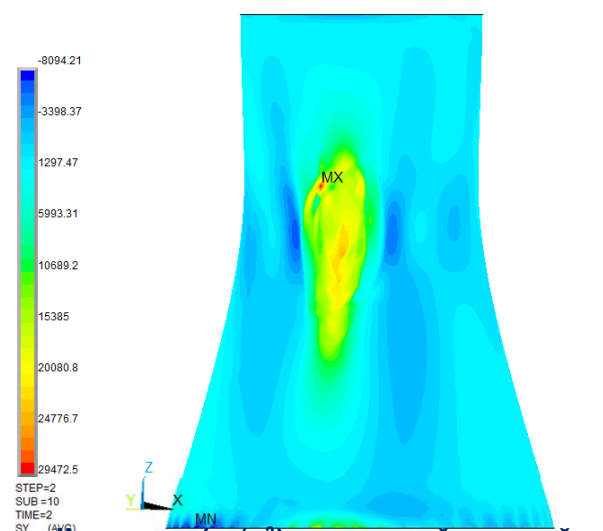
График зависимости максимальных
перемещений от нагрузки



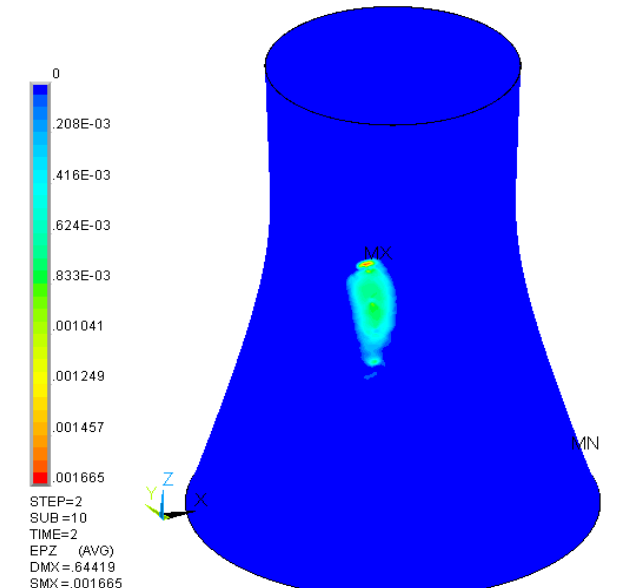
Расчетное определение НДС, прочности и устойчивости конструкции градирен.
Нелинейный расчет на воздействие смерча. *ПК ANSYS Mechanical*



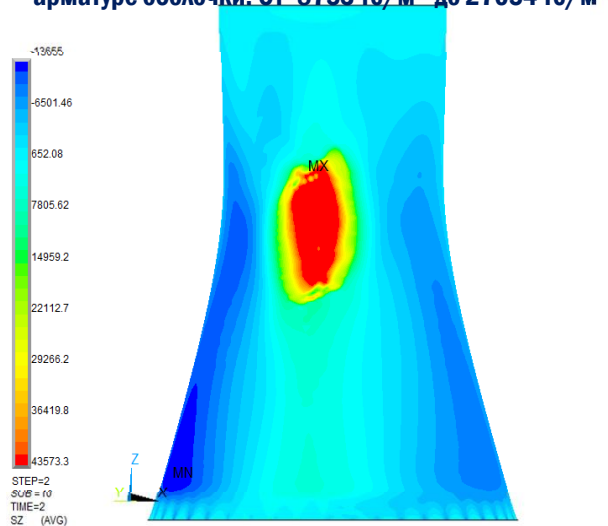
Напряжение (тс/м²) во внешней кольцевой
арматуре оболочки. От -8753 тс/м² до 27054 тс/м²



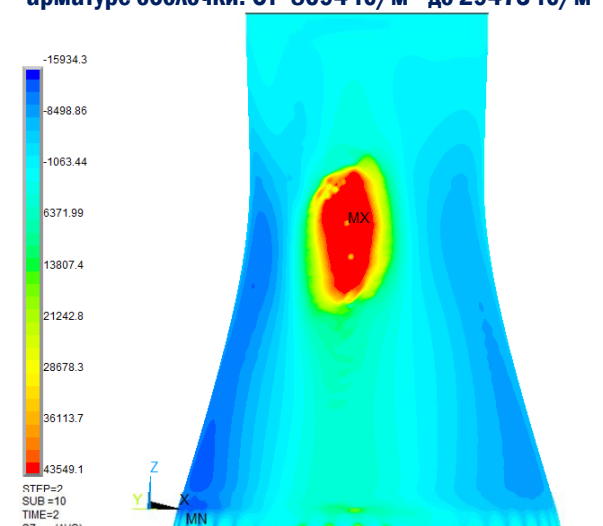
Напряжение (тс/м²) во внутренней кольцевой
арматуре оболочки. От -8094 тс/м² до 29473 тс/м²



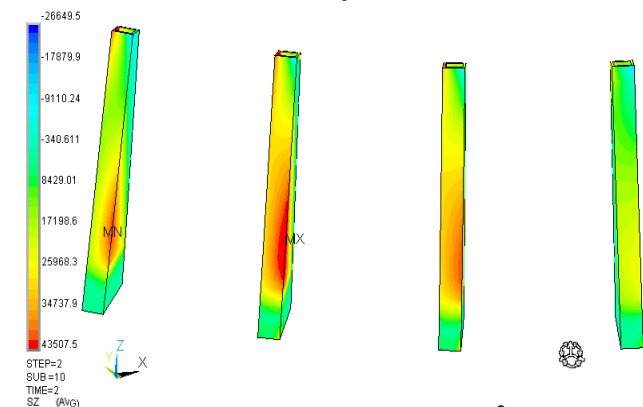
Зона пластических деформации в меридиональной
Максимум 0.001665



Напряжение (тс/м²) во внешней меридиональной
арматуре оболочки. От -13655 тс/м² до 43573 тс/м²



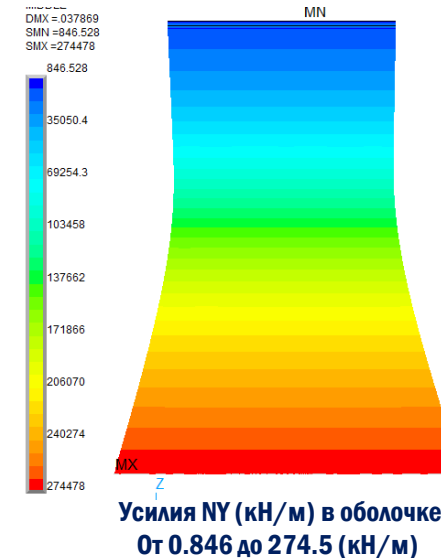
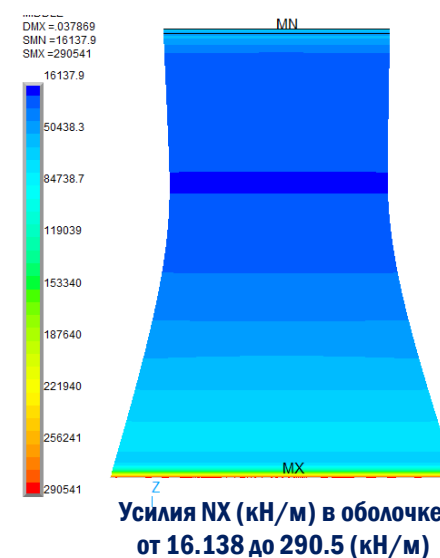
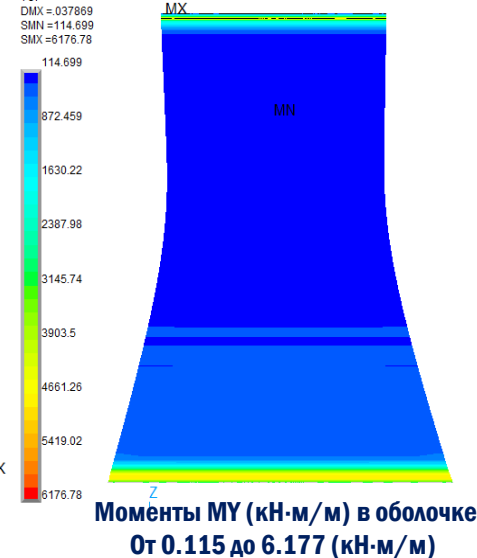
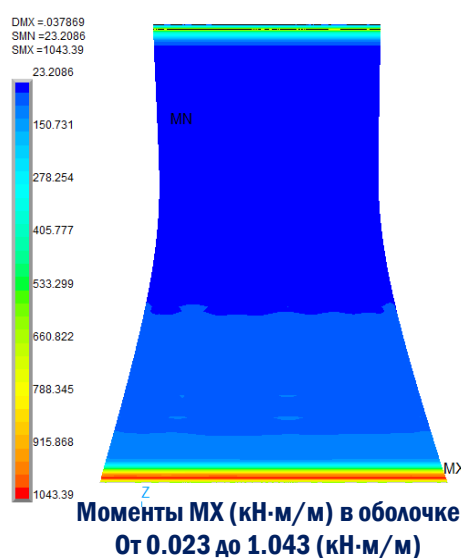
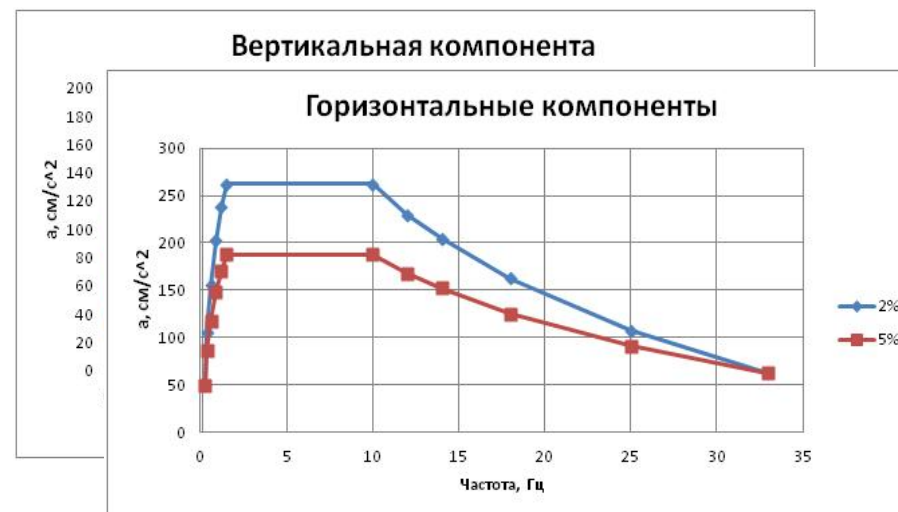
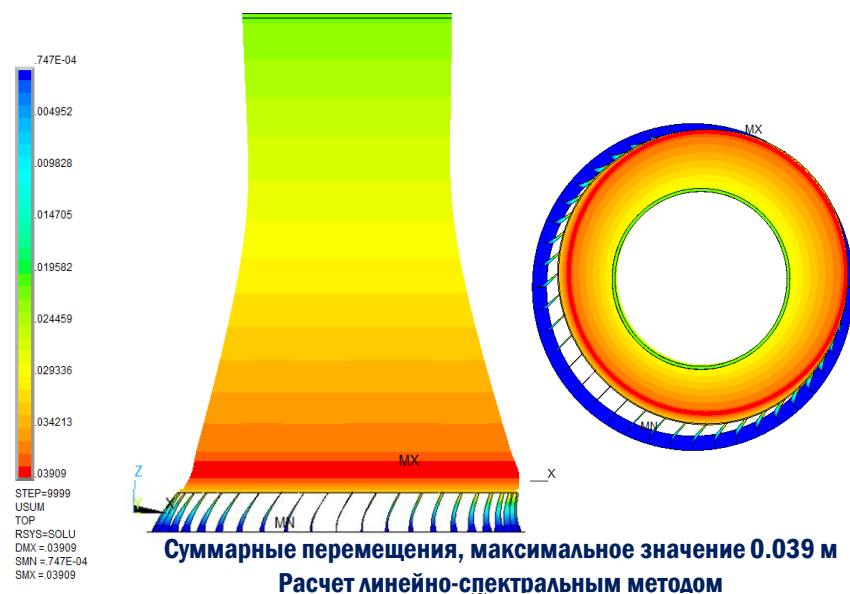
Напряжение (тс/м²) во внутренней меридиональной
арматуре оболочки. От -15934 тс/м² до 43549 тс/м²



Напряжение (тс/м²) в
меридиональной арматуре колонн
От -26650 тс/м² до 43507 тс/м²

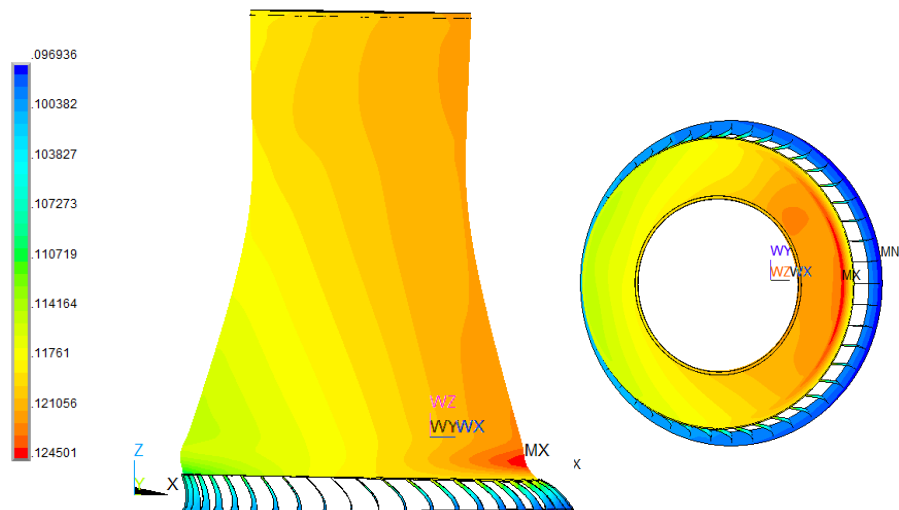


Расчетное определение НДС, прочности и устойчивости конструкции градирен. Расчет на сейсмическое воздействие линейно-спектральным методом. *ПК ANSYS Mechanical*

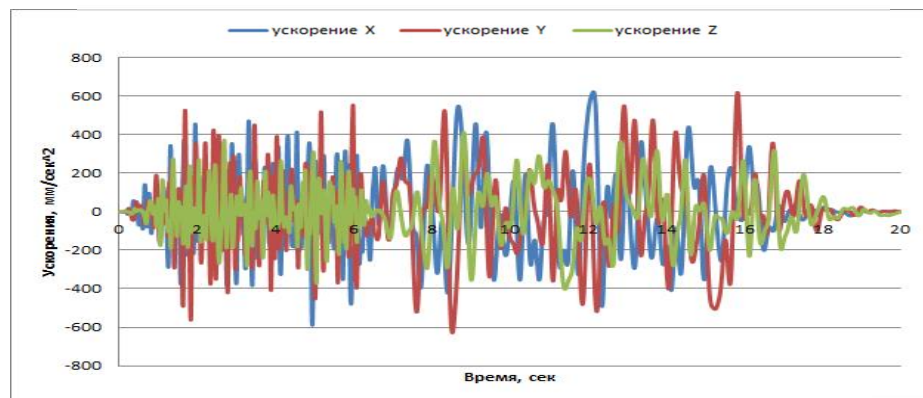




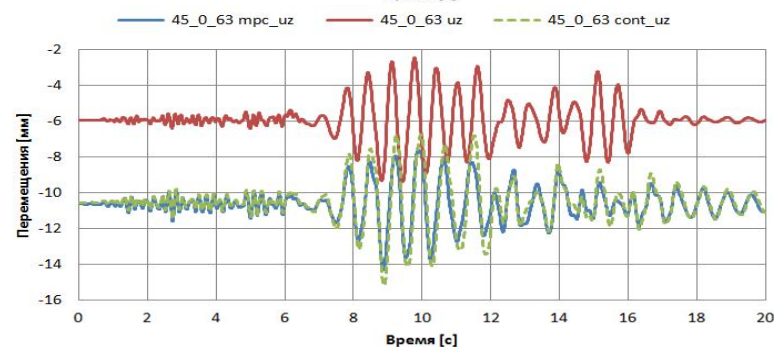
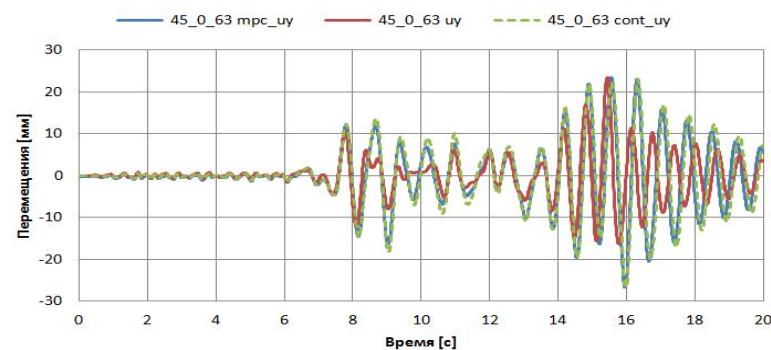
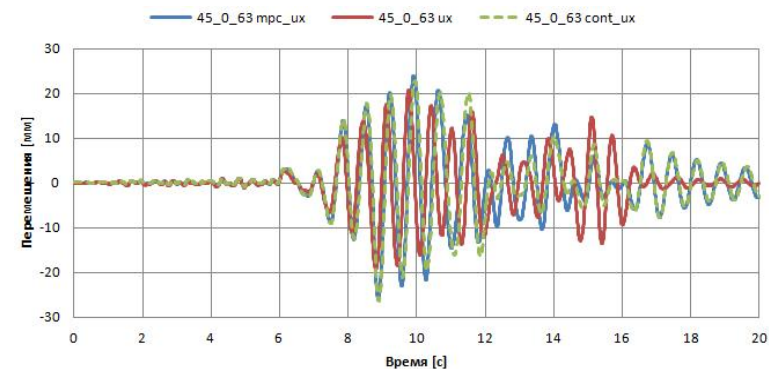
Расчетное определение НДС, прочности и устойчивости конструкции градирен. Расчет на сейсмическое воздействие прямым динамическим методом. *ПК ANSYS Mechanical*



Суммарные перемещения (м) в момент времени $t = 8,85$ с.
Результаты с учетом перемещений основания. Максимальное значение 0.125 (м), минимальное значение 0.097 (м)



Унифицированные акселерограммы (mm/s^2) для базового проекта АЭС-2006, 6 баллов по шкале MSK-64.

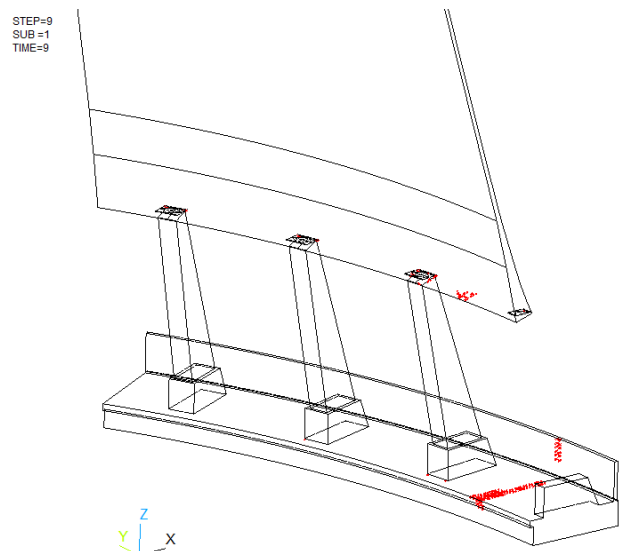


Перемещения UX, UY, UZ (мм) для узлов на высоте 63 м относительно основания в трех постановках. Синяя линия – "неразрывный" MPC контакт, красная линия – на жестком основании, зеленая пунктирная линия – стандартный контакт.

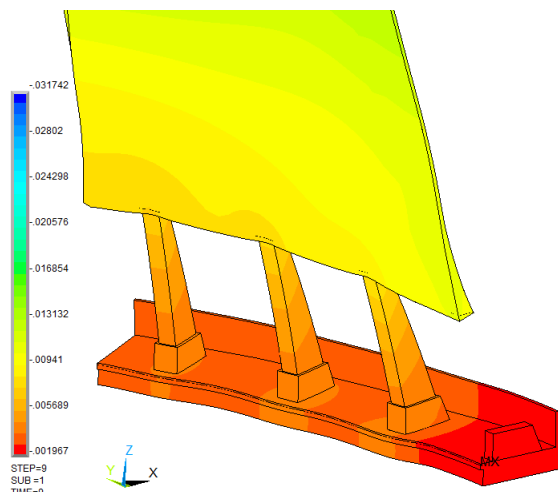


Расчетное определение НДС, прочности и устойчивости конструкции градирен.

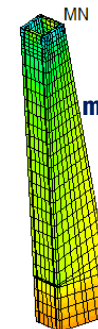
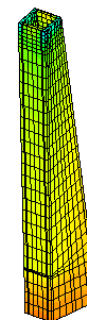
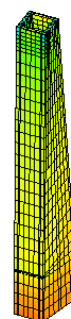
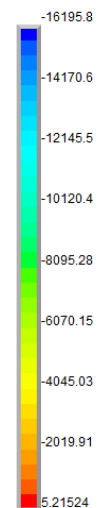
Аварийная ситуация. *ПК ANSYS Mechanical*



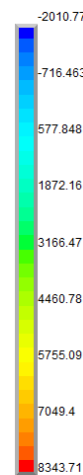
Картина трещинообразования после удаления колонны



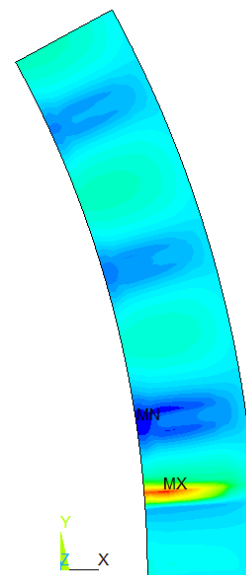
Перемещения UZ (м) после удаления колонны.
Min -0.002 м, Max -0.0317 м



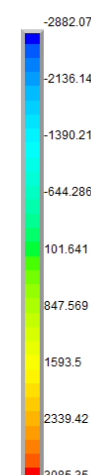
Напряжение (тс/м²) в меридиональной арматуре колонн. Удалена одна из несущих колонн
min -16196 тс/м², max -5 тс/м²
(min -162.0 МПа, max -0.05 МПа)



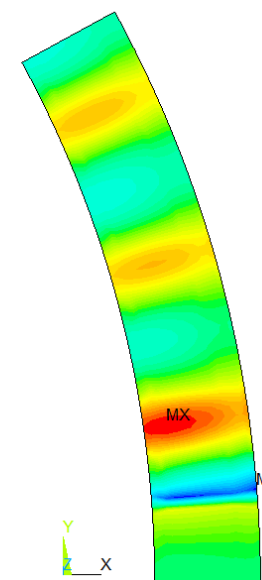
STEP=9
SUB=1
TIME=9
CY / F41021



Напряжения (тс/м²) в кольцевой (от -20.1 МПа до 83.4 МПа) верхней арматуре фундаментной плиты



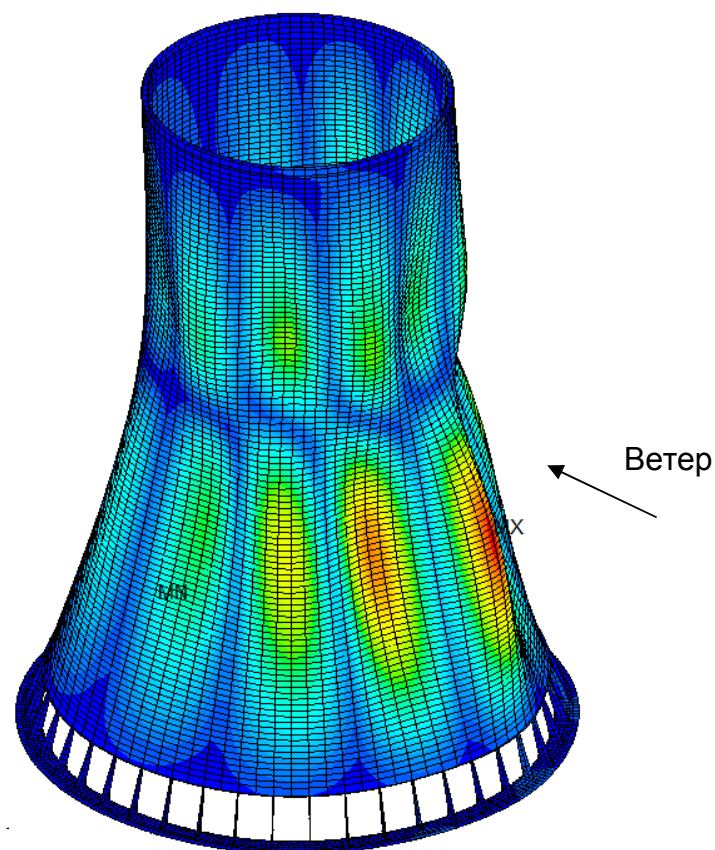
STEP=9
SUB=1
TIME=9



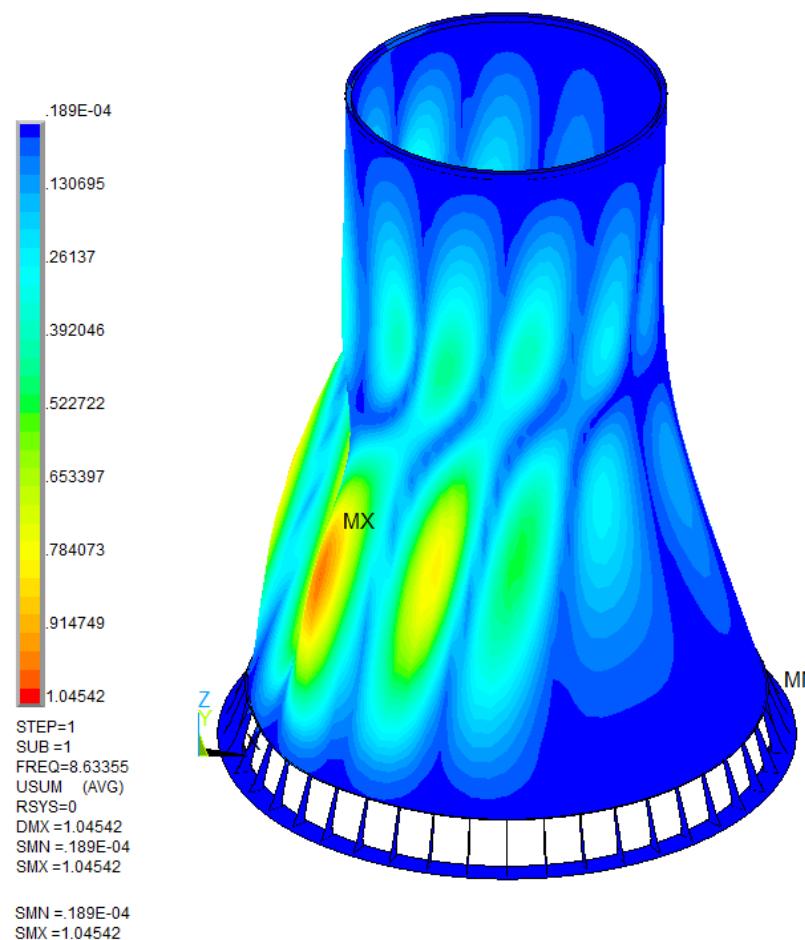
Напряжения (тс/м²) в кольцевой (от -28.8 МПа до 30.85 МПа) нижней арматуре фундаментной плиты



Расчетное определение НДС, прочности и устойчивости конструкции градирен. Формы потери устойчивости. *ПК ANSYS Mechanical*



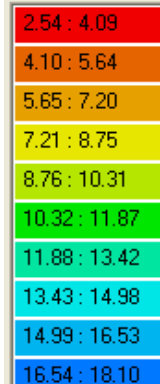
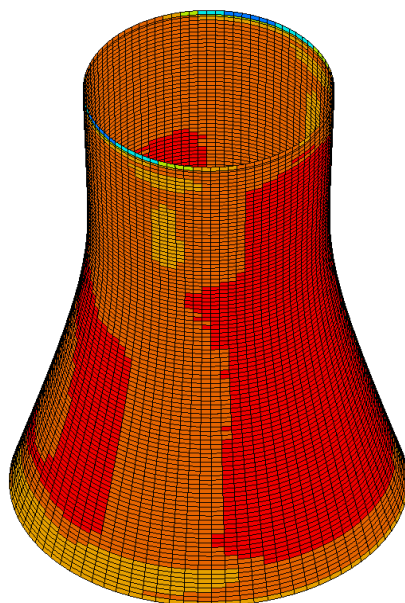
Форма потери устойчивости градирни от основного сочетания с проектным ветром. Расчетный запас по устойчивости 6.63



Форма потери устойчивости от особого сочетания с воздействием торнадо.
Сценарий 1 воздействия торнадо на группу из двух градирен (градирня 2). Момент времени $t = 9.0$ с. Расчетный запас по устойчивости 8.63

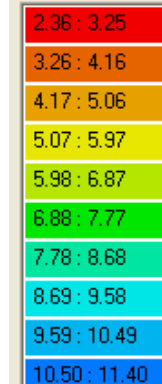
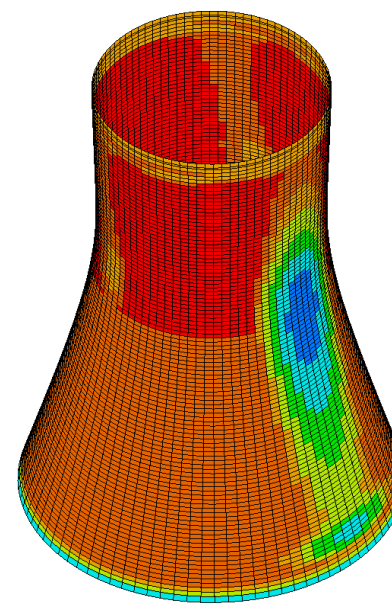
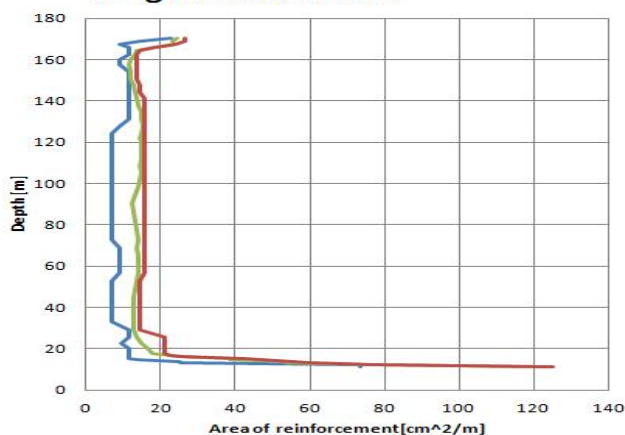


Расчетное определение НДС, прочности и устойчивости конструкции градирен. Оценка армирования. *ПК ОМ СНиП Железобетон*



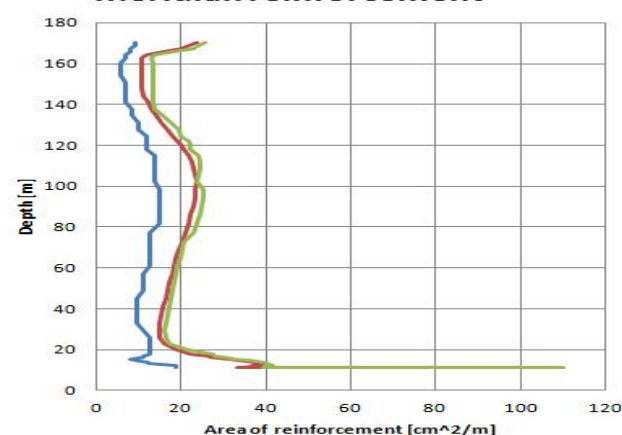
Кольцевая арматура на внешней грани
оболочки ($\text{см}^2/\text{м}$)

Ring reinforcement



Меридиональная арматура на внешней
грани оболочки ($\text{см}^2/\text{м}$)

Meridian reinforcement



Суммарное армирование оболочки для основного сочетания нагрузок.
Синяя линия – необходимое по нашим расчетам, красная – итоговое по данным SPX, зеленая – проектное армирование



Расчетное определение НДС, прочности и устойчивости конструкции градирен. Выводы.

- Отсутствие значимых эффектов геометрической нелинейности в деформировании оболочки градирни;
- *Заметное* влияние податливости опорного контура (фундаментная плита и колонны – "слабое звено") на статическое состояние, динамику и устойчивость системы;
- Значимые для ветровых и сейсмических воздействий собственные формы колебаний (общее смещение оболочки на деформируемых колоннах) характеризуются низкими частотами и перегибом (изломом) в зоне нижнего опорного кольца.
- Достаточную прочность и устойчивость оболочки.
- Несущая способность конструкции и неразрушение оболочки при внешнем ветровом воздействии, соответствующем "проектному" ураганному ветру по результатам физически и геометрически нелинейного расчета обеспечивается с запасом 1.6;
- Из рассмотренных сценариев "надвижения" смерча (торнадо) интенсивностью 3,16 по шкале Фудзиты наиболее опасным является вариант воздействия на изолированную градирню; результаты физически линейного расчета и проверка проектного армирования (программа «ОМ СНиП Железобетон») показывают, что необходимый запас прочности обеспечен;
- Проведенный дополнительно физически и геометрически нелинейный расчет в квазистатической постановке для вышеуказанного сценария торнадо продемонстрировал значимое трещинообразование, пластическое деформирование арматуры и разрушение в "правой" (относительно направления движения торнадо) зоне оболочки от действия положительного давления при "закручивании" вихря.



Расчетное определение НДС, прочности и устойчивости конструкции градирен. Выводы (окончание).

- Расчеты на 6-балльное сейсмическое воздействие по линейно-спектральному методу с учетом более чем 2000 собственных форм в диапазоне частот до 33 Гц показали максимальные суммарные сейсмические перемещения до 39 мм и определяются доминантными формами с частотами 1.517 Гц и 2.526 Гц;
- Расчеты на 6-балльное сейсмическое воздействие, заданное трехкомпонентными акселерограммами, по платформенной и волновой (с учетом поведения грунта) схемам показали максимальные суммарные перемещения узлов до 30 и 27 мм соответственно ;
- Общая устойчивость конструкции по Эйлеру при действующих нагрузках и воздействиях (весовых, температурных, ветровых, ураганных, смерчевых, сейсмических) обеспечивается с достаточными запасами (5.12 и выше);
- Расчет "на аварийную ситуацию" в нелинейной постановке для рассмотренного сценария инициирующего локального разрушения обосновал устойчивость несущей конструкции на прогрессирующее обрушение при удалении одной из колонн;
- Расчеты армирования по СП 52-101-2003, выполненные по сертифицированной программе «ОМ СНиП Железобетон» для рассмотренных сочетаний нагрузок и воздействий, показали, что :
 - — необходимые параметры кольцевого и меридионального армирования оболочки не превышают проектных значений;
 - — необходимые параметры радиального и кольцевого армирования фундаментной плиты также не превышают проектных значений для основных сочетаний нагрузок.

Спасибо за внимание!