



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

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

*Московский государственный строительный университет
(МГСУ)*



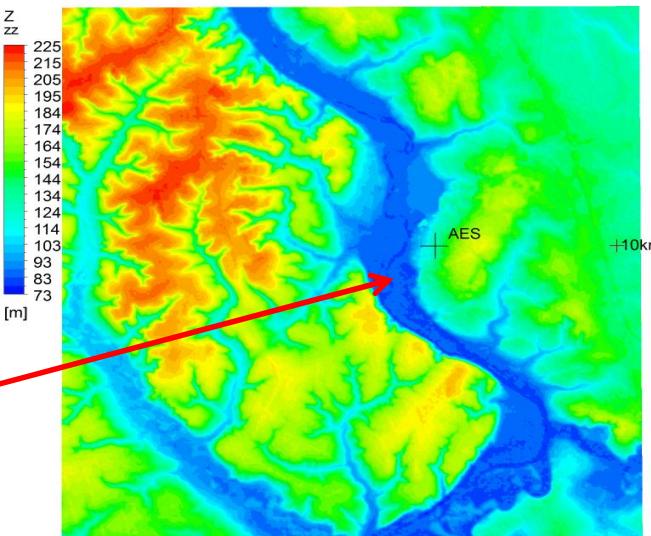
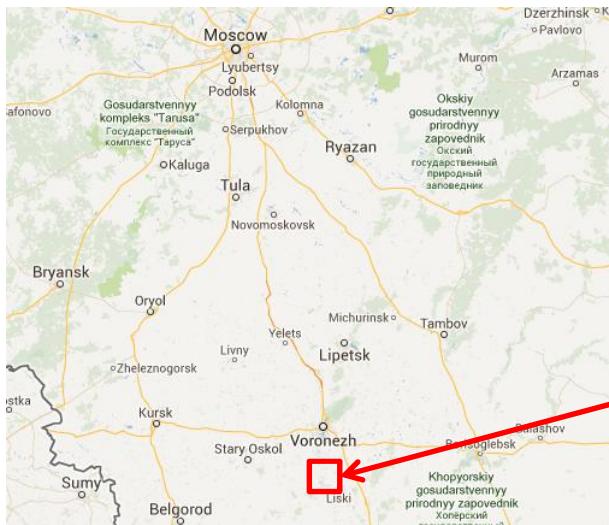


Этапы расчетных исследований

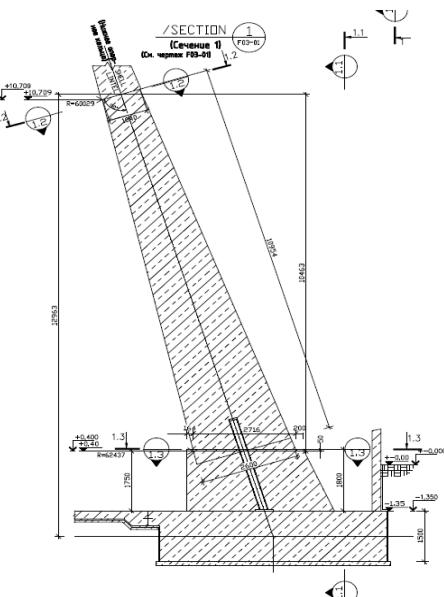
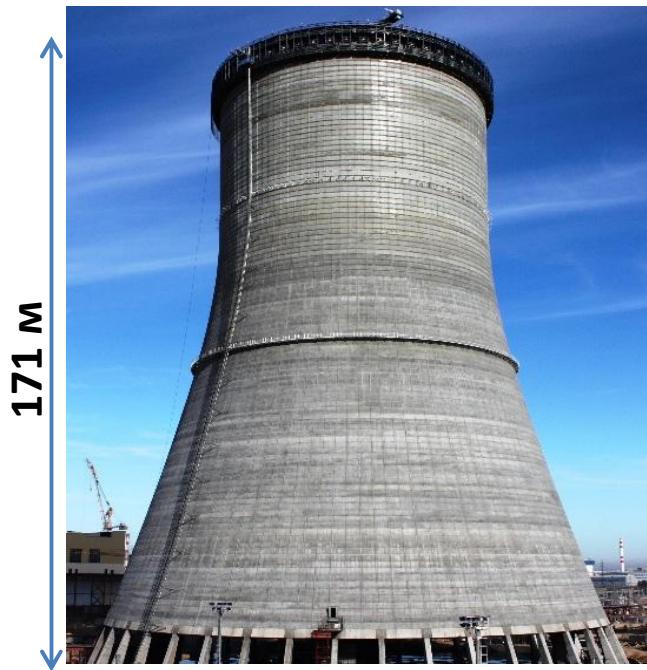
- Обработка и обобщение исходных данных
- Реализация и верификация методики расчета основных и особых (экстремальных) ветровых нагрузок и воздействий на основе CFD (специальный доклад)
- Разработка численных CFD моделей. Граничные условия (профили ветра и т.п), выбор моделей турбулентности и параметров 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

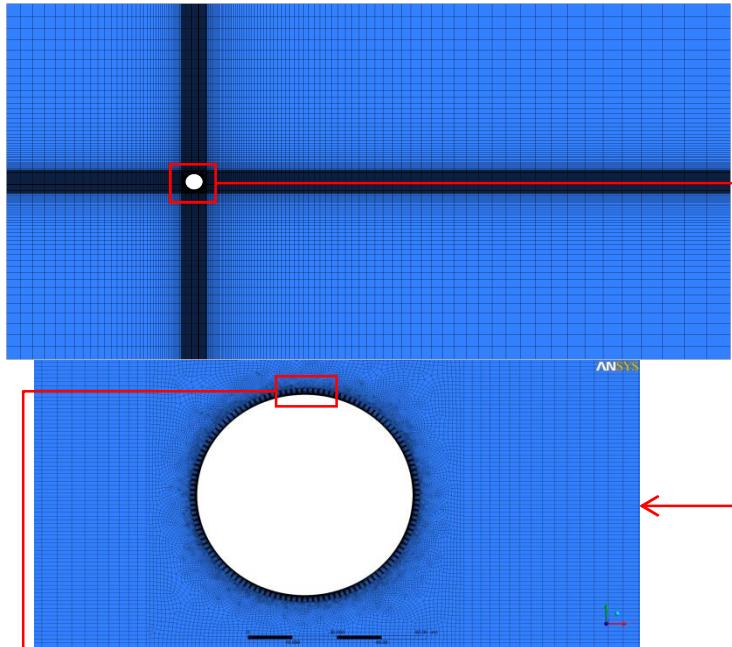


Конструкция колоннады

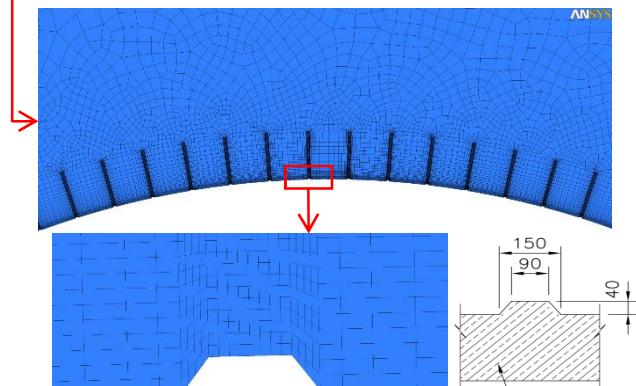
Сентябрь 2013



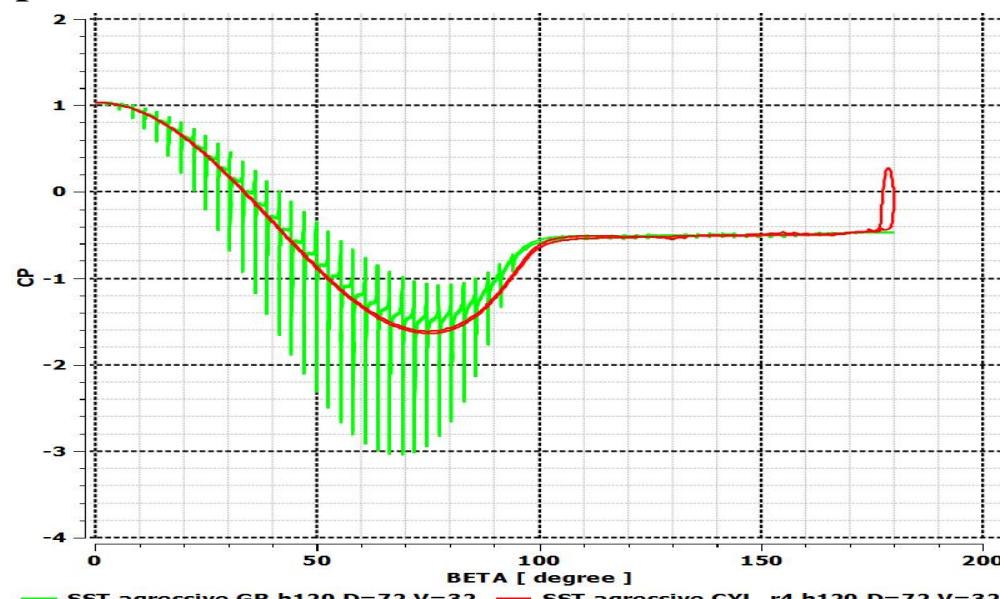
Ветровая аэродинамика. Подбор эквивалентной шероховатости поверхности градирен. ПК ANSYS CFD



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



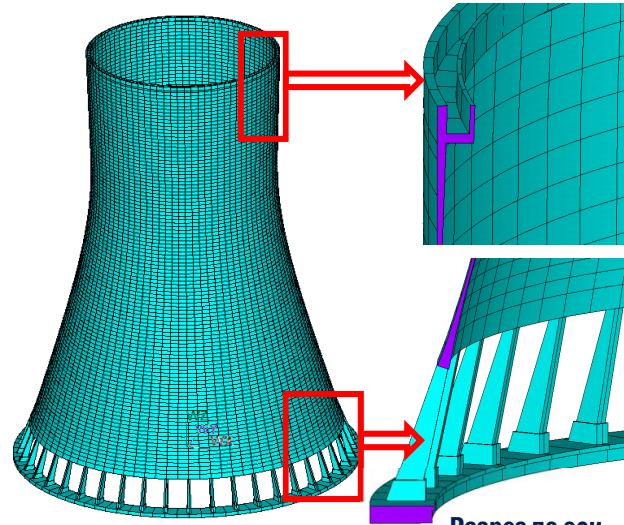
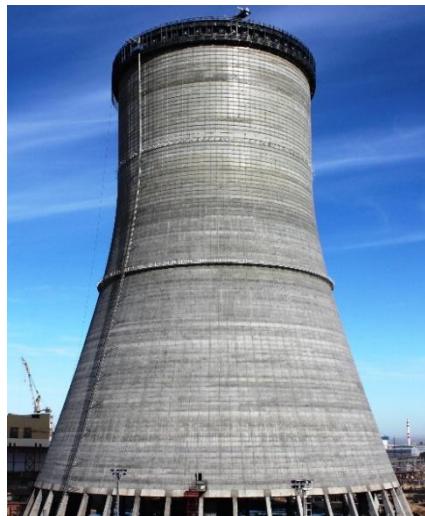
Эпюры средних C_p от угловой координаты :
с заданной шероховатостью – красная линия,
с замоделированными ребрами – зеленая линия.

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

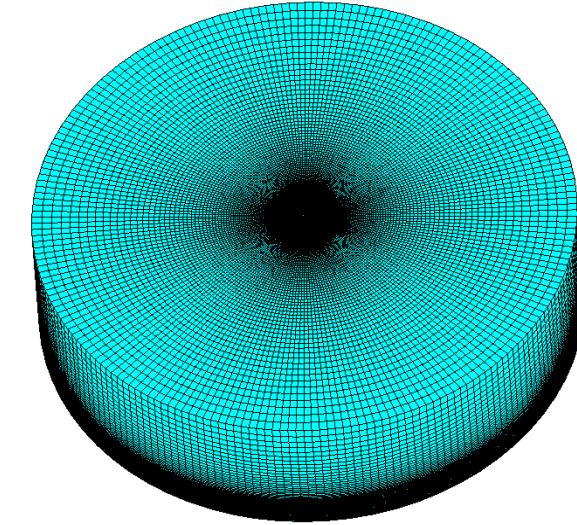
При подобранный эквивалентной шероховатости (0.04 м) результаты для цилиндра и для модели, точно воспроизводящей геометрию ребер, весьма близки (отличие не превышает 10%)



Ветровая аэродинамика. Разработка расчетной модели. ПК ANSYS CFD

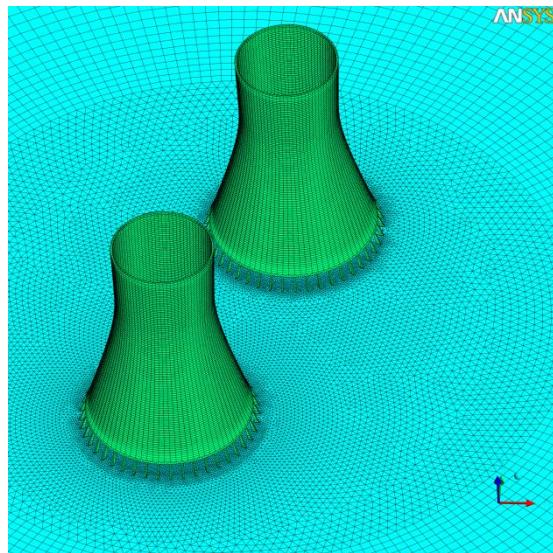


Геометрическая модель

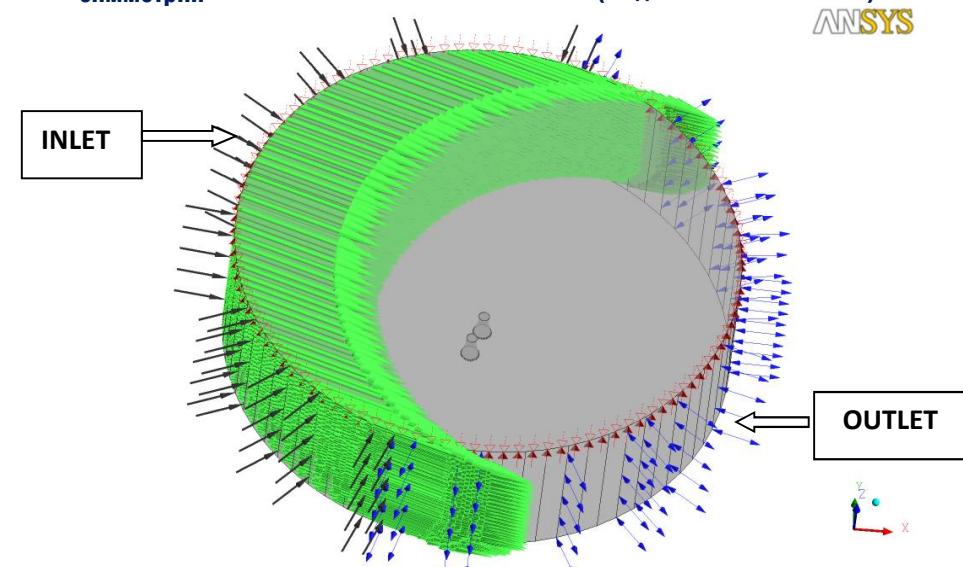


Расчетная область (модель 5.28 млн. ячеек)

ANSYS

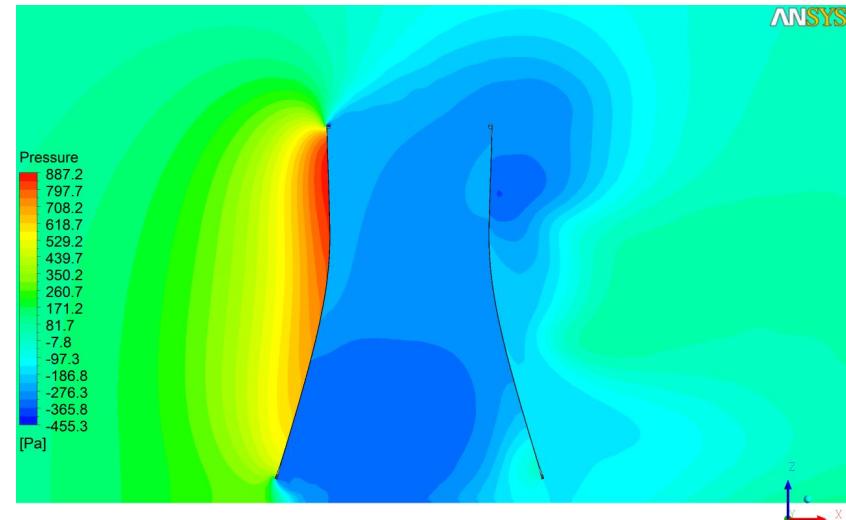
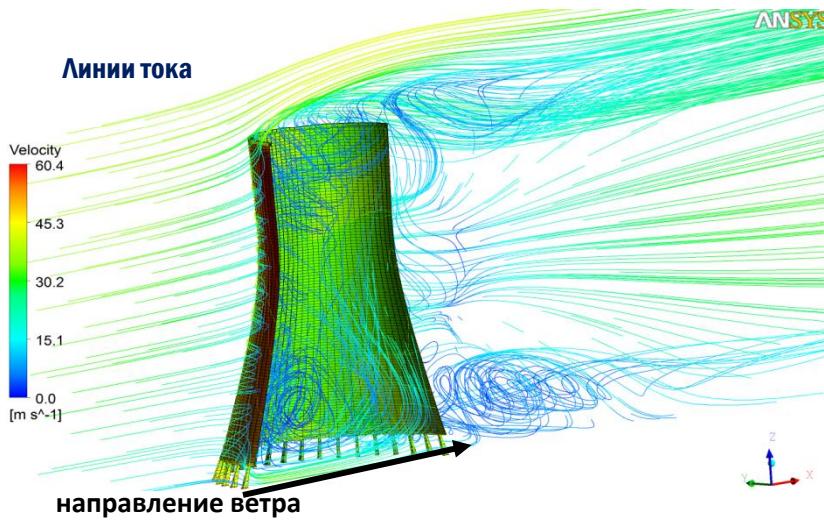


Поверхностная сетка на градирнях (модель с 5.28 млн. ячеек)



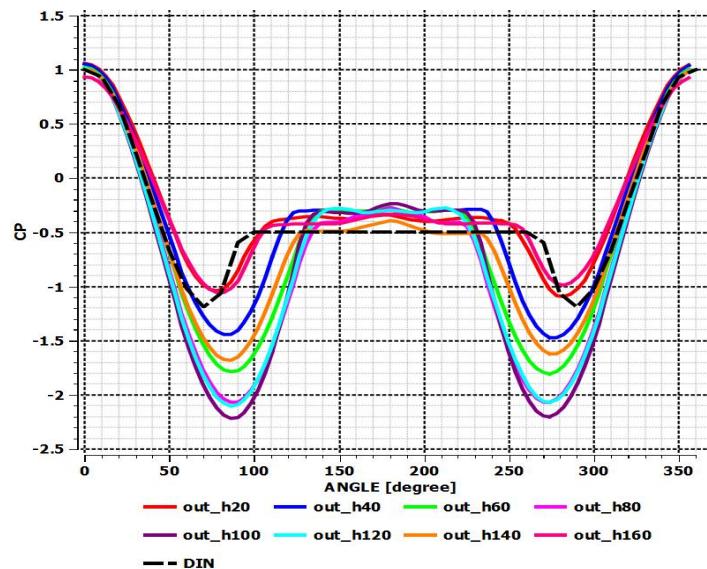
Расчетная область с обозначенными граничными условиями.
Угол атаки ветра 0°

Ветровая аэродинамика. Результаты стационарного расчета. ПК ANSYS CFD

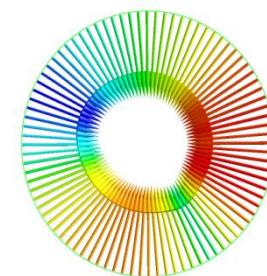
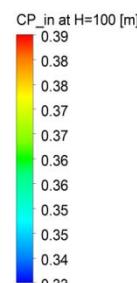
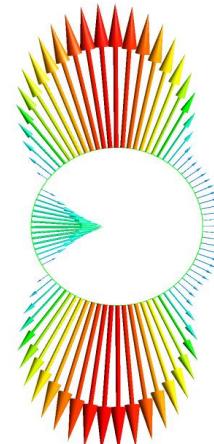
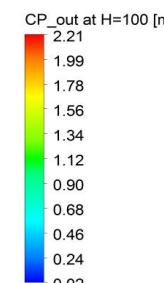


Среднее давление ветра в плоскости симметрии XZ, от -455 Па до 887 Па.
Стационарная постановка

ANSYS

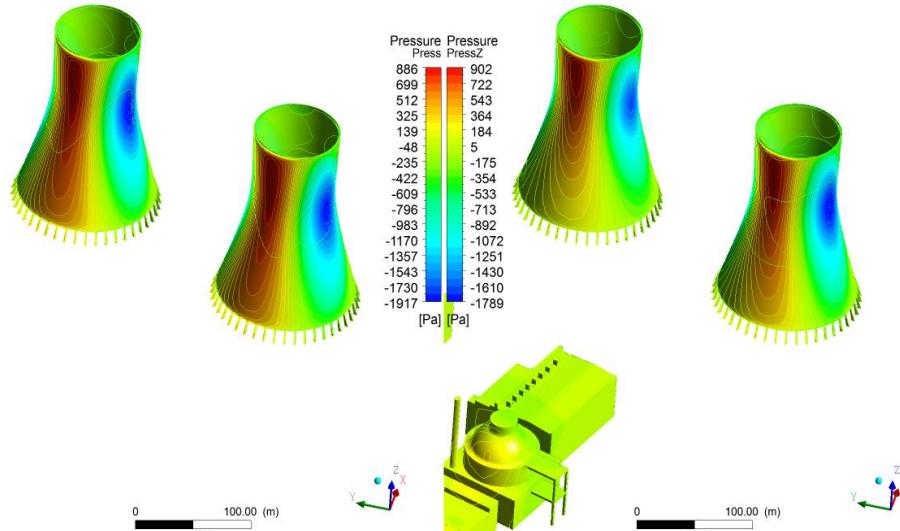


Аэродинамический коэффициент давления Ср на внешней поверхности градирни (out) на разных высотах (от 20 м до 160 м)
Вертикальная ось – значение Ср, горизонтальная ось – угловая координата, α

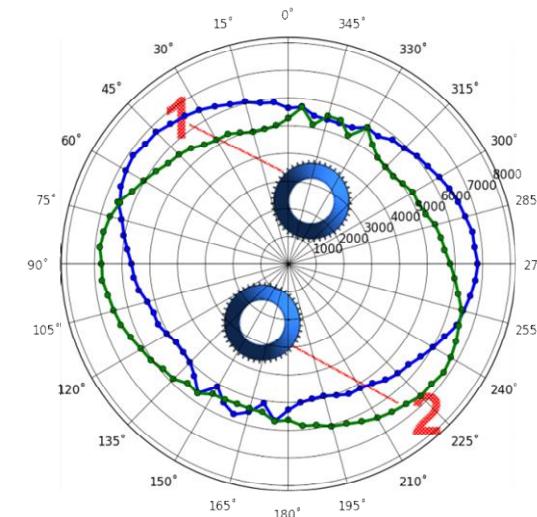


Эпюра аэродинамического коэффициента давления Ср на внешней и внутренней поверхностях градирни на высоте 100 м

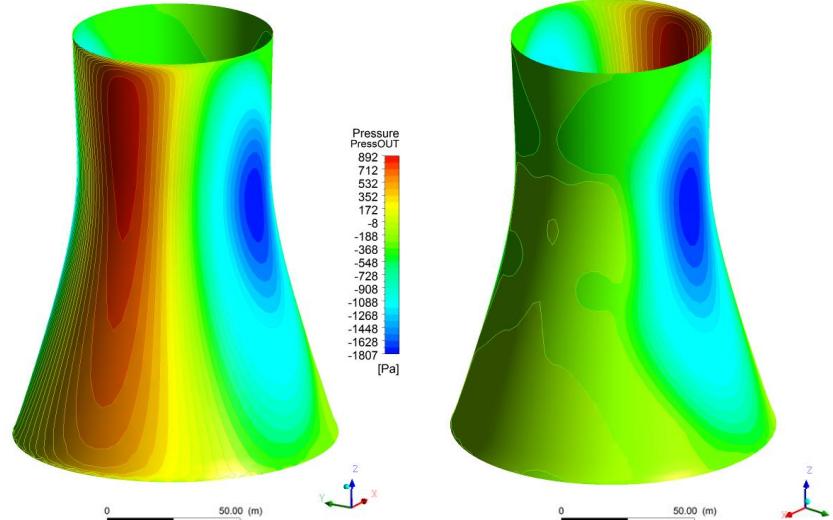
Ветровая аэродинамика. Результаты стационарного расчета. **ПК ANSYS CFD**



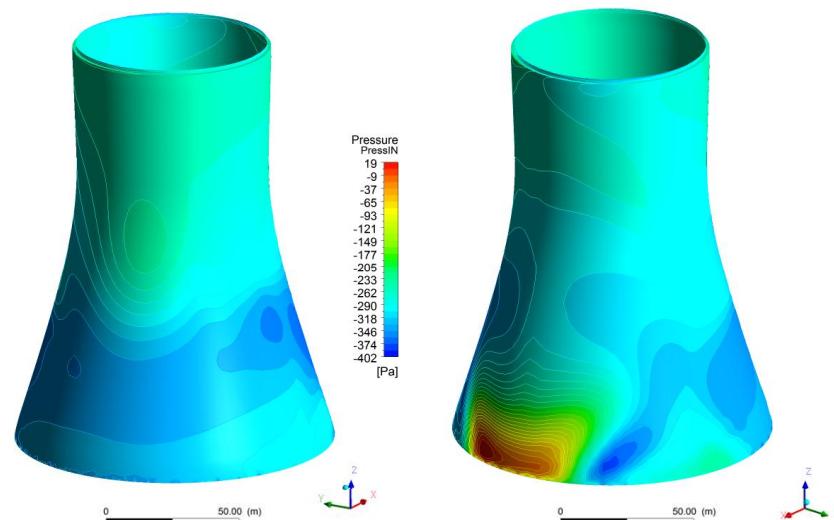
Среднее давление ветра на поверхности градирен. Влияние застройки
Расчет с "застройкой" (справа) – от -1789 Па до 902 Па,
расчет без "застройки" (слева) – от -1917 Па до 886 Па



Равнодействующие средние ветровые нагрузки (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

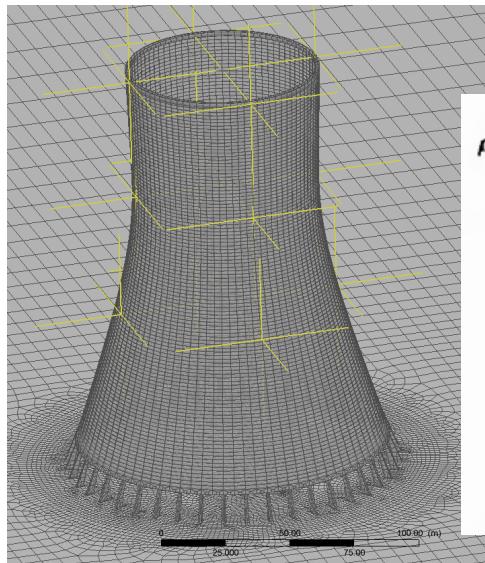


Изолированная градирня. Расчет на воздействие смерча. ПК ANSYS CFD

Класс смерча по Фудзита 3,16 согласно ТЗ

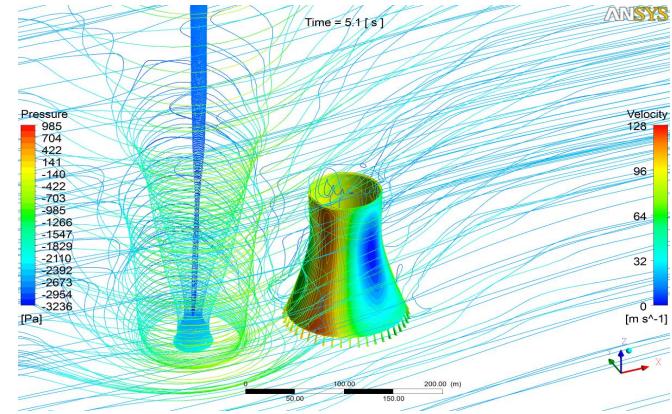
Тангенциальная составляющая скорости

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

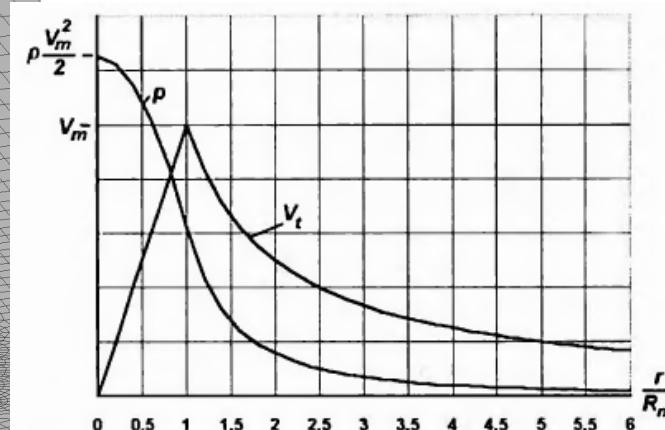


Давления разряжения

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

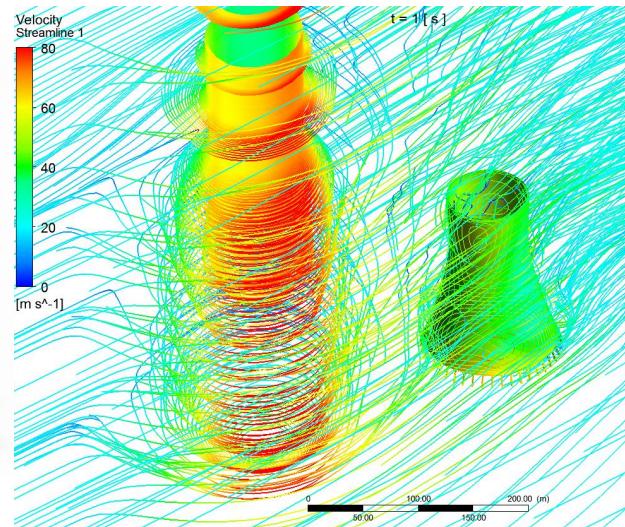


Линии тока и скорости ветра в окрестности градирни для момента времени $T=5,1$ с



Точки мониторинга

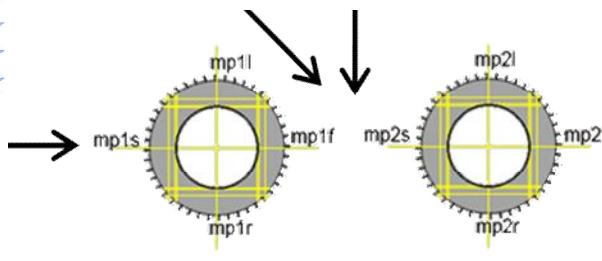
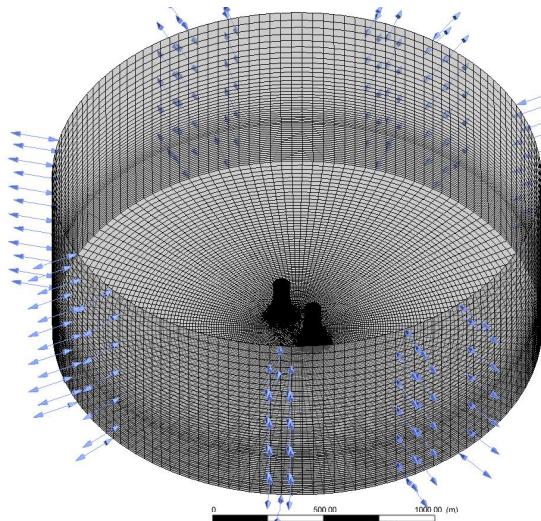
Изменение тангенциальной скорости и давления для вихря Ренкина



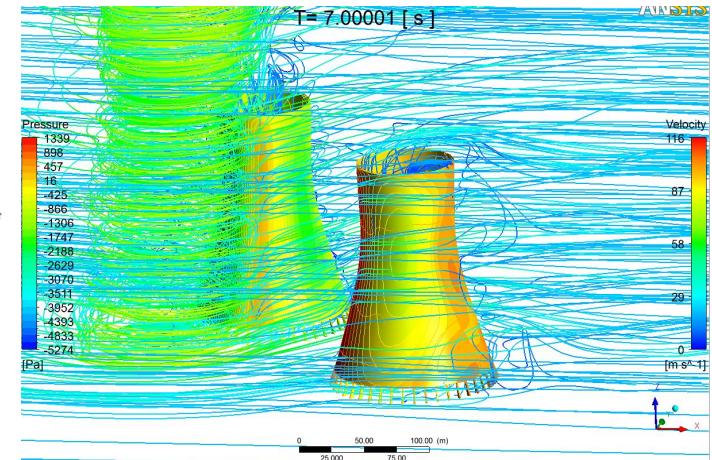
Линии тока и скорости ветра в окрестности градирни для момента времени $T=1$ с (расстояние от “стенки” смерча до стенки градирни примерно 180 м)



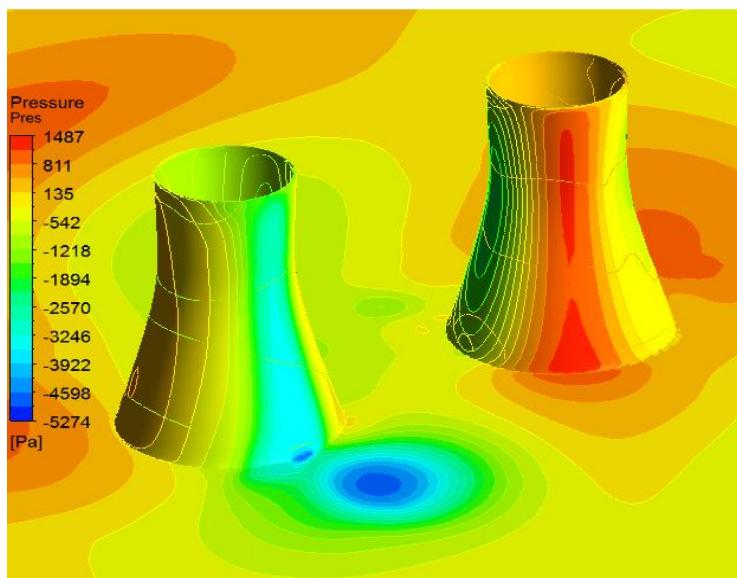
Две градирни. Расчет на воздействие смерча. ПК ANSYS CFD



Расчетные сценарии

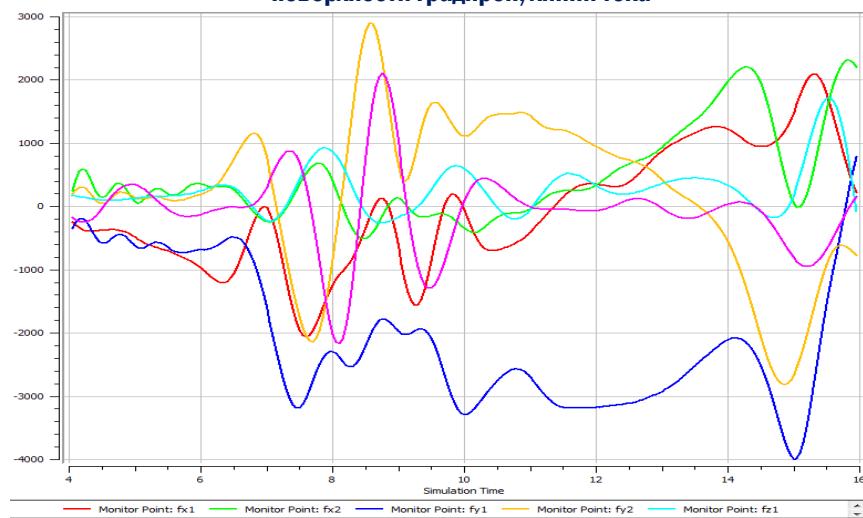


Расчетная область (модель 1.8 млн. ячеек)



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

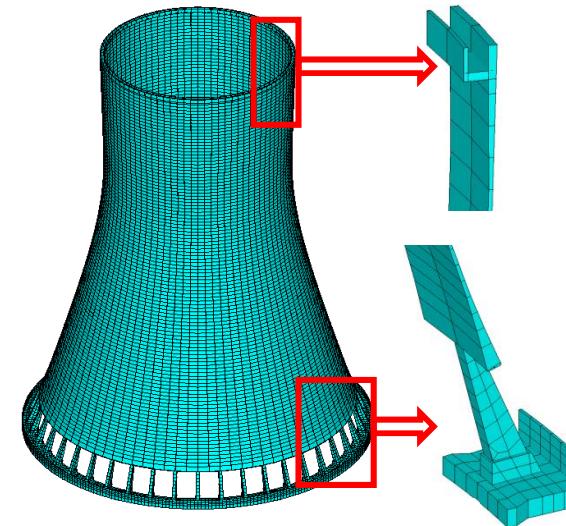
Момент времени 7 секунд после начала движения. Давления (Па) на поверхности градирен, линии тока



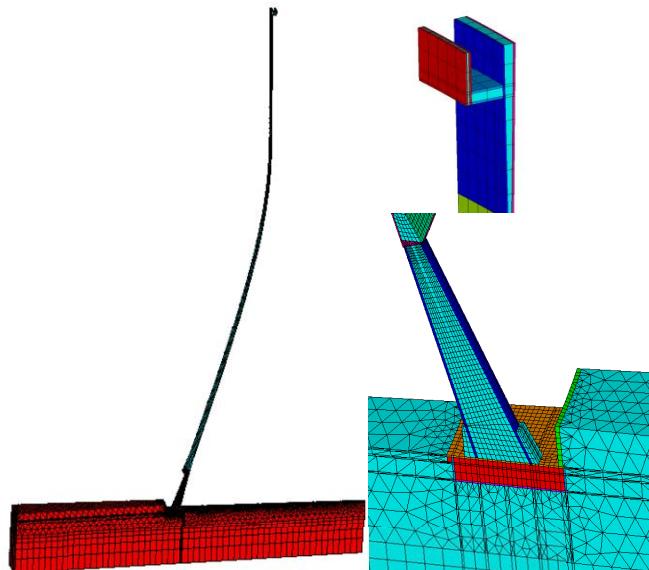
Суммарные нагрузки (тс) FX и FY на 1 и 2 градирню от торнадо во времени (сек)



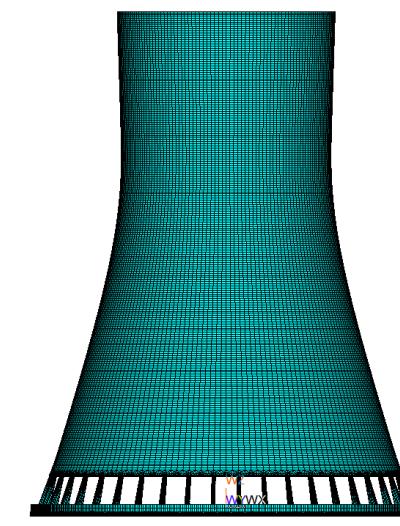
Расчетное определение НДС, прочности и устойчивости конструкции градирен. Разработка расчетной модели. *PK ANSYS Mechanical*



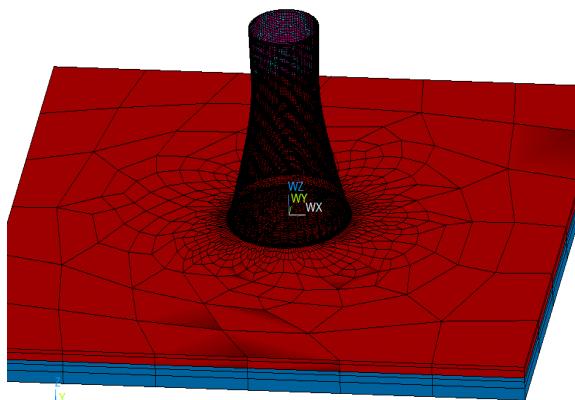
Оболочечная КЭ модель
14 тыс. узлов



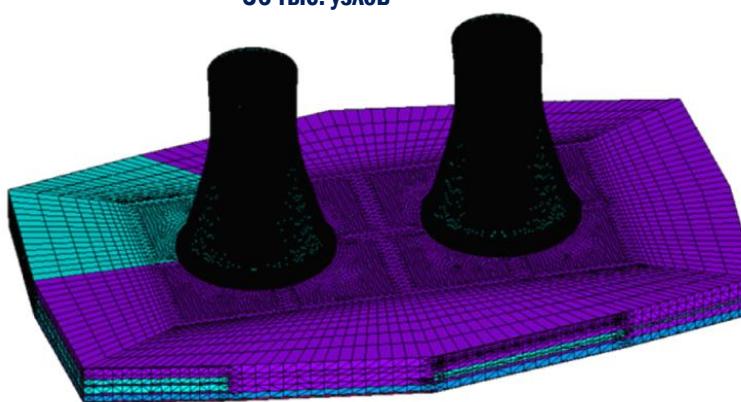
Объемная КЭ модель сектора 1/88
часть с грунтовым основанием
36 тыс. узлов



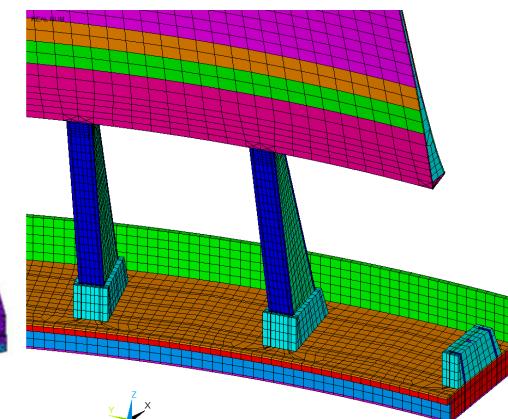
Объемная КЭ модель
724 тыс. узлов



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

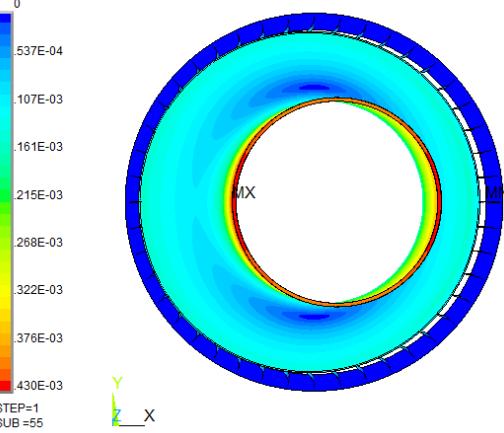
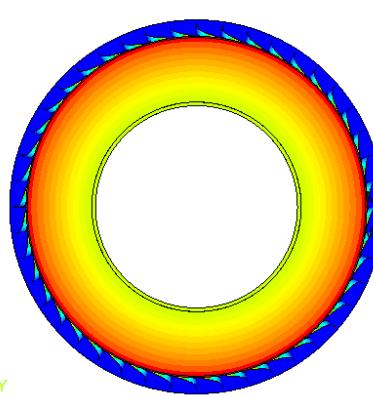
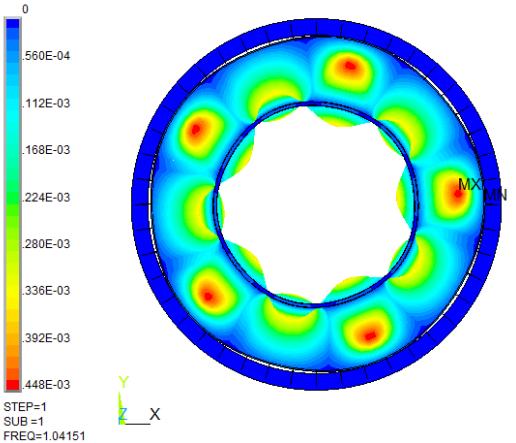
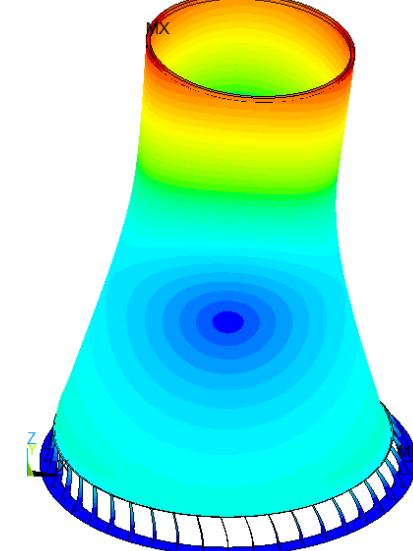
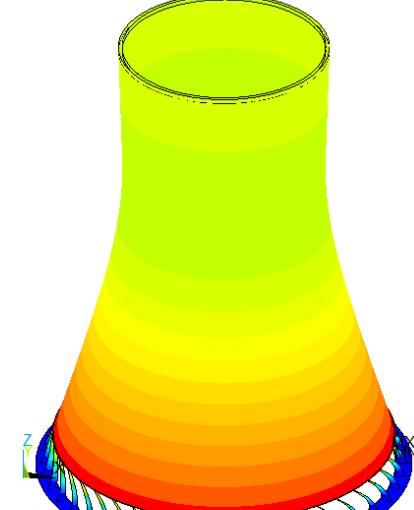
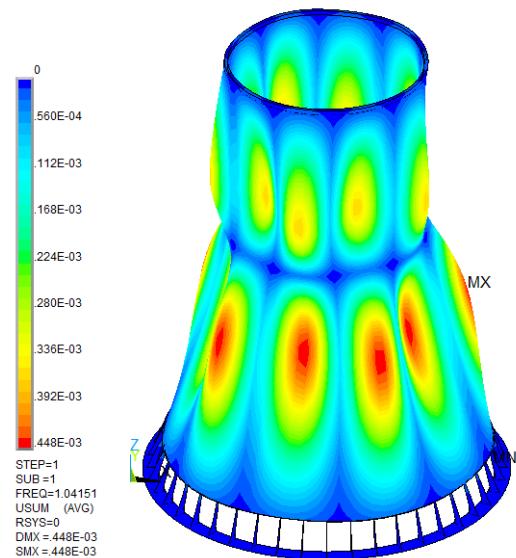


объемная КЭ-модель для расчета на
аварийную ситуацию
49 тыс. узлов



Расчетное определение НДС, прочности и устойчивости конструкции градирен.

Результаты модального анализа. *ПК ANSYS Mechanical*



Оболочечная модель градирни (на жестком основании)

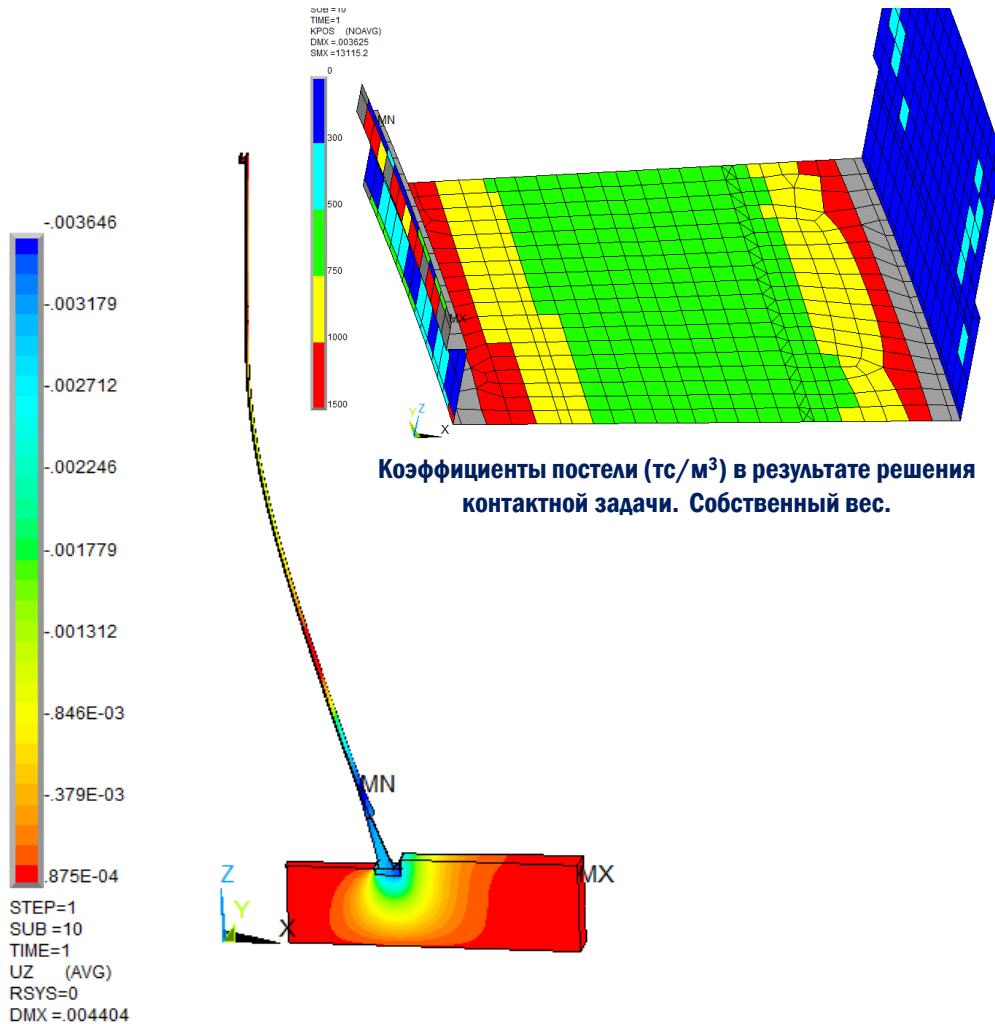
1-я собственная форма колебаний (5 волн по окружности), $f = 1.0415$ Гц.

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

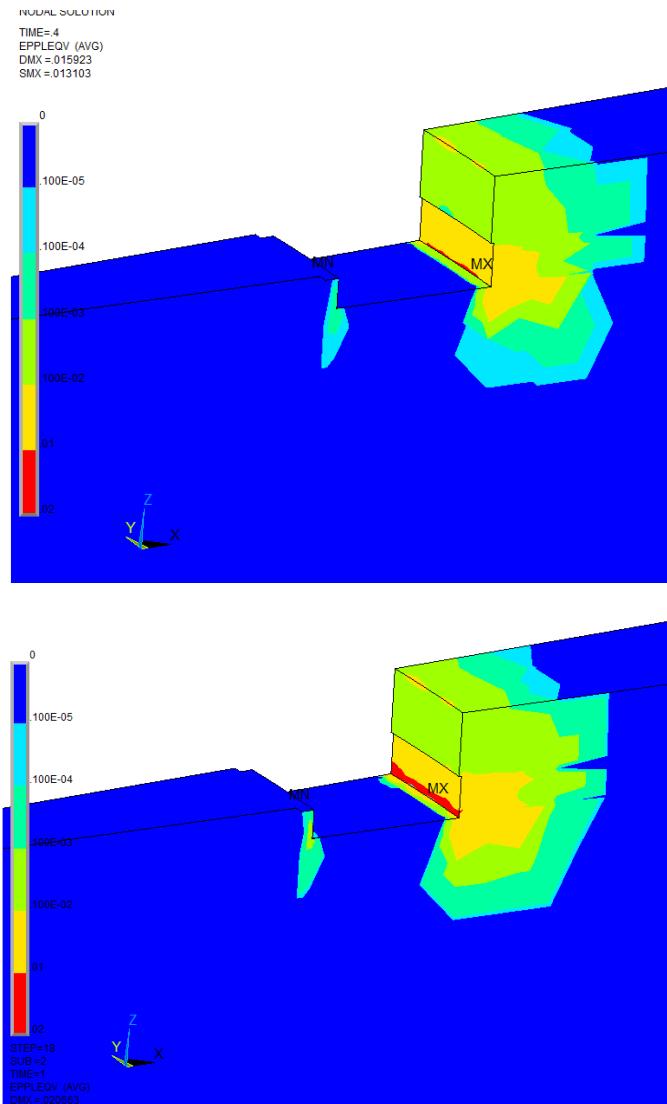
Сейсмически значимые кратные 54-я и 55-я собственные формы колебания,
 $f = 2.6064$ Гц.



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



Коэффициенты постели ($\text{тс}/\text{м}^3$) в результате решения контактной задачи. Собственный вес.

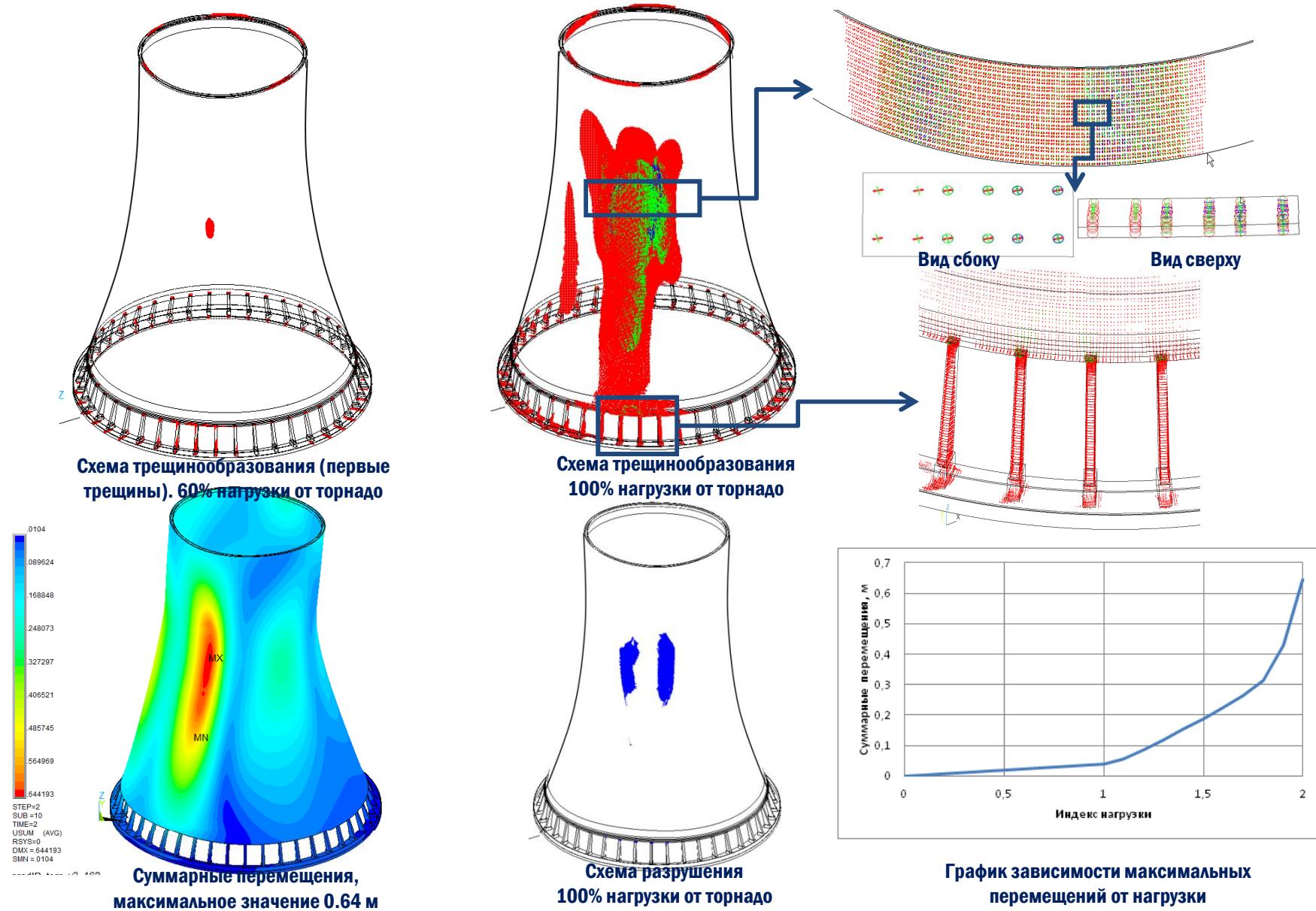


Пластические деформации в грунтах при 40% (сверху) и 100% (снизу) возведении, сцепление 1 кПа. Собственный вес.

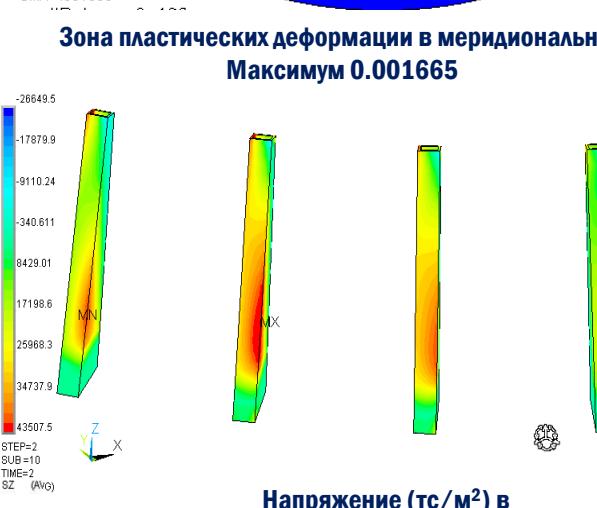
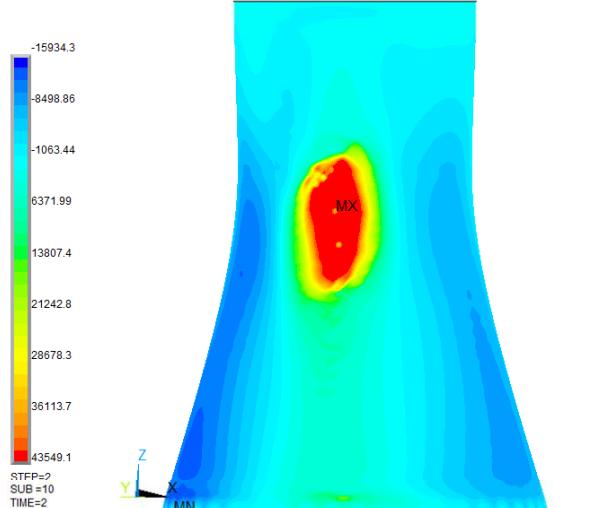
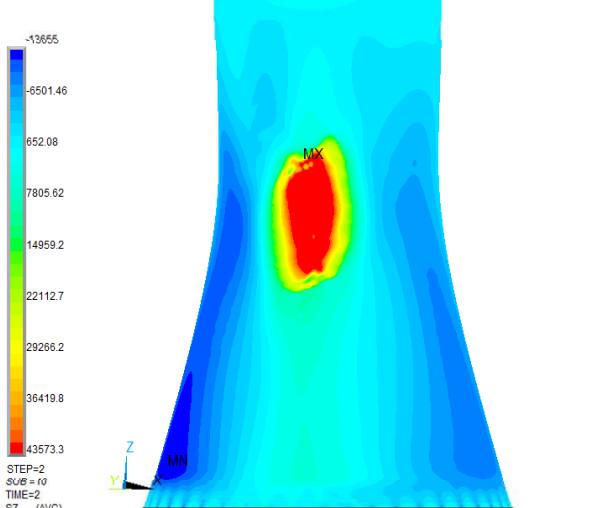
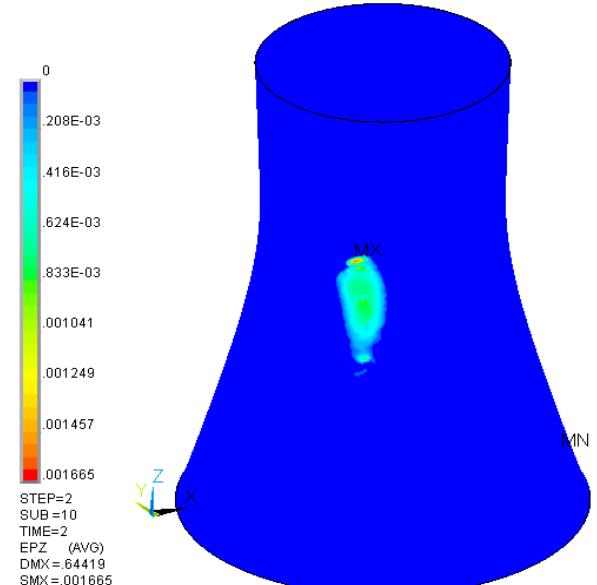
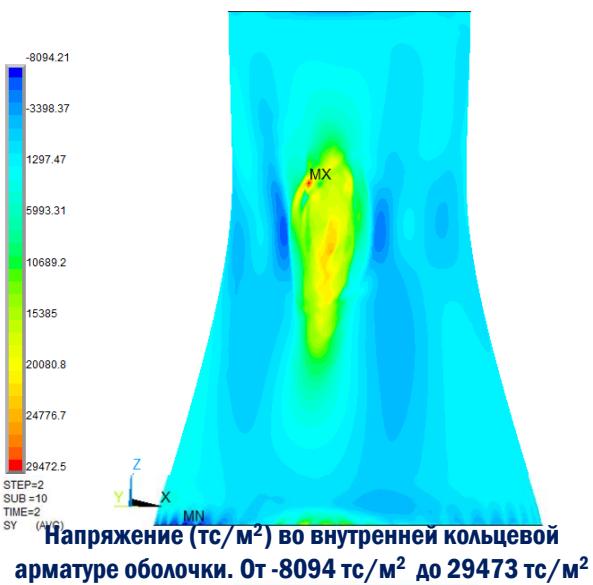
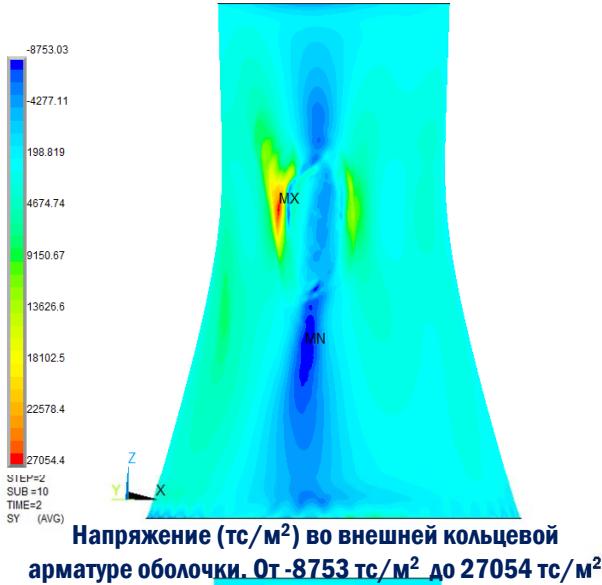
Вертикальные (м) перемещения в модели. Максимальное значение $0.875 \cdot 10^{-4}$ м, минимальное -0.003646 м. Собственный вес



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

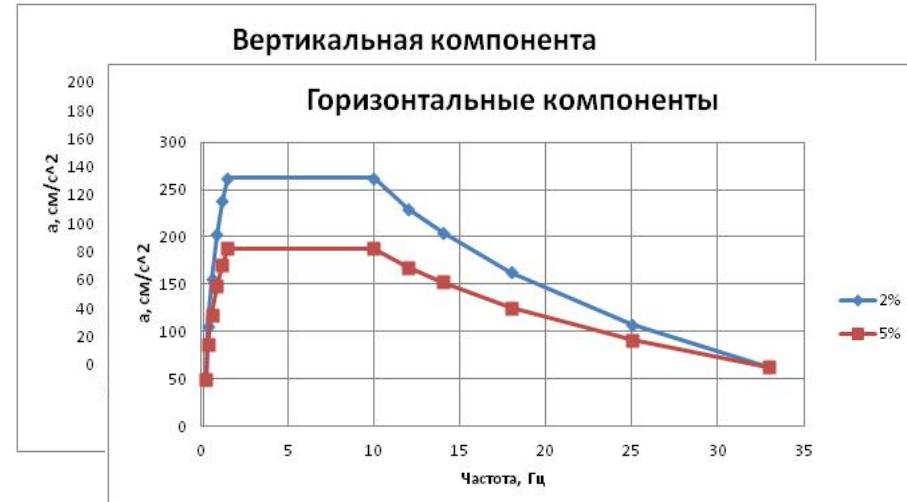
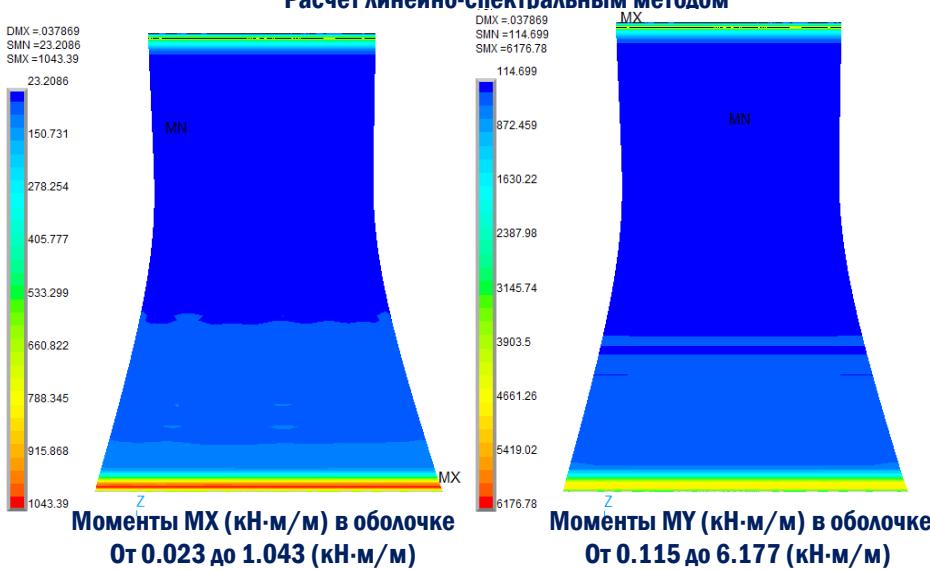
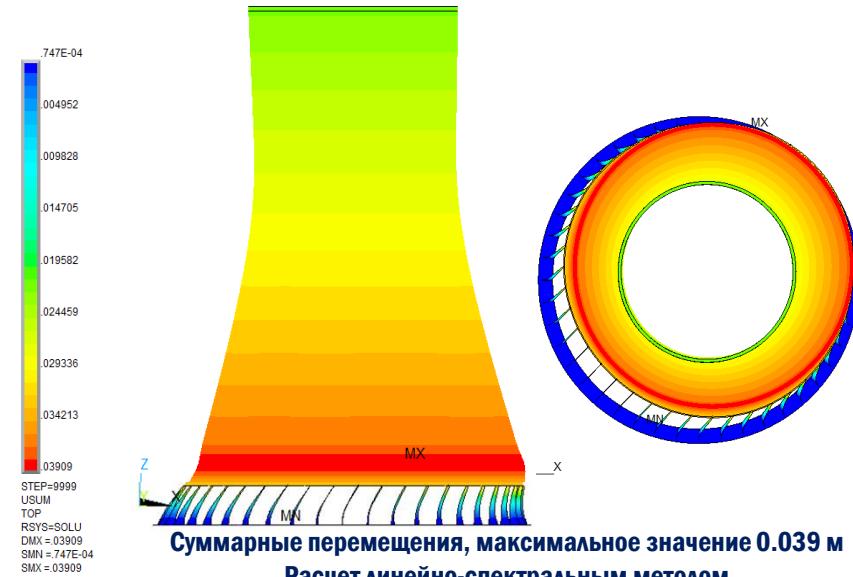


Расчетное определение НДС, прочности и устойчивости конструкции градирен. Нелинейный расчет на воздействие смерча. *ПК ANSYS Mechanical*

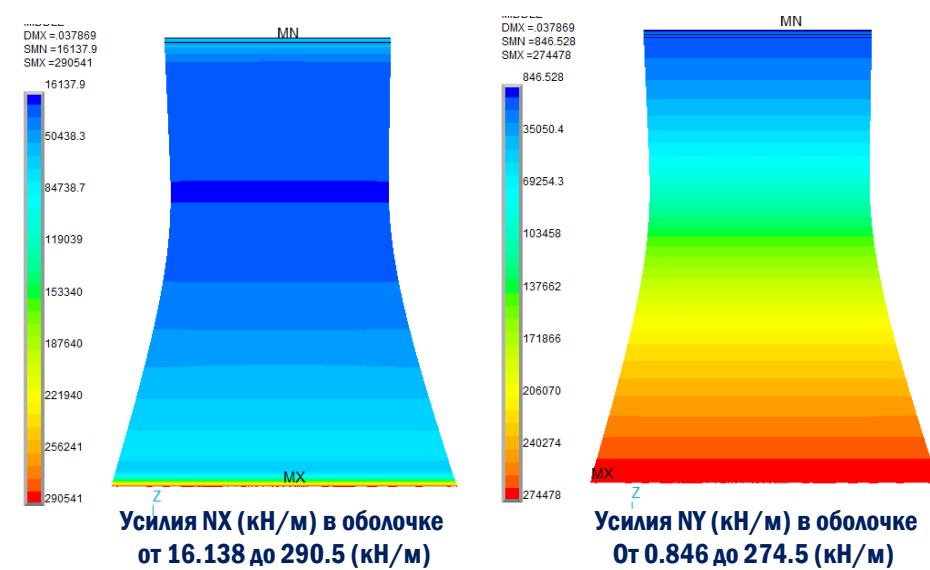




Расчетное определение НДС, прочности и устойчивости конструкции градирен. Расчет на сейсмическое воздействие линейно-спектральным методом. ПК ANSYS Mechanical

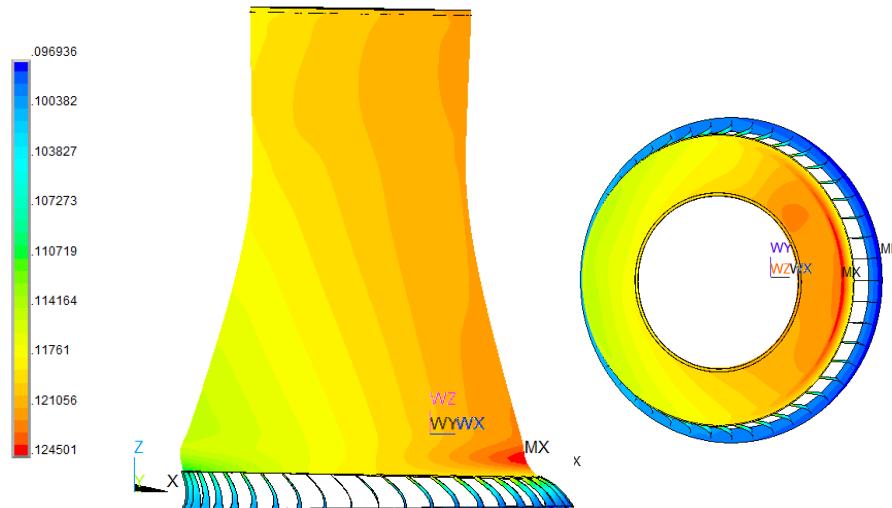


Спектры реакции (см/с²) для базового проекта
АЭС-2006, 6 баллов по шкале MSK-64.





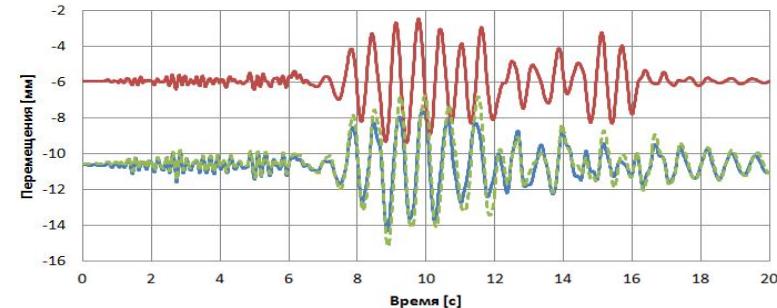
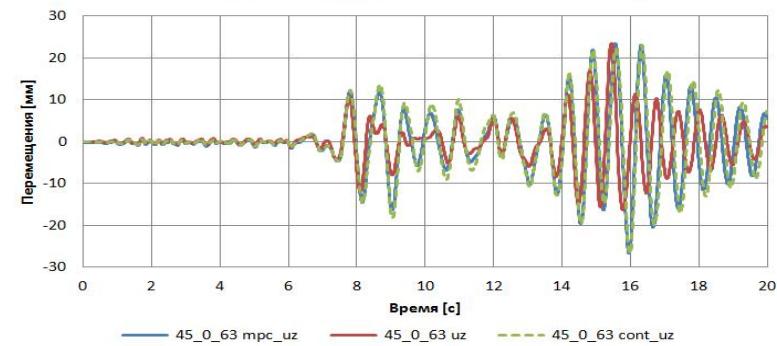
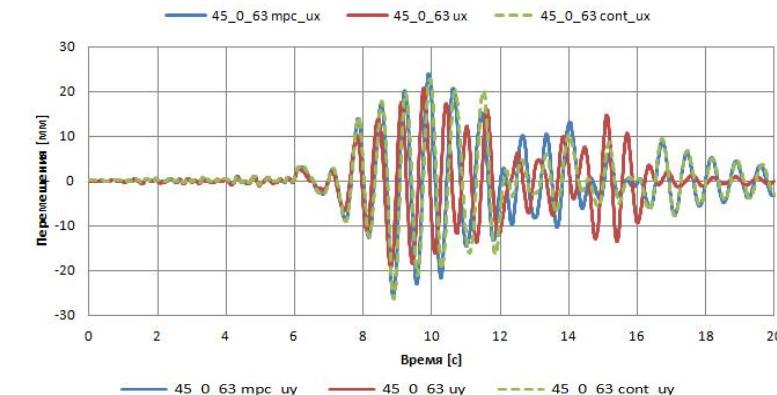
Расчетное определение НДС, прочности и устойчивости конструкции градирен. Расчет на сейсмическое воздействие прямым динамическим методом. ПК ANSYS Mechanical



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 ($\text{мм}/\text{с}^2$) для базового проекта АЭС-2006, 6 баллов по шкале MSK-64.

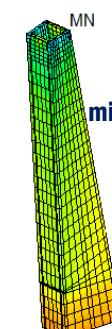
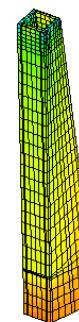
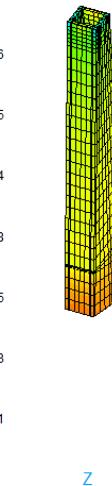
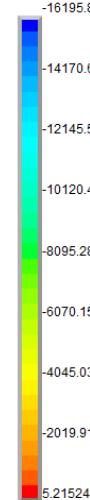
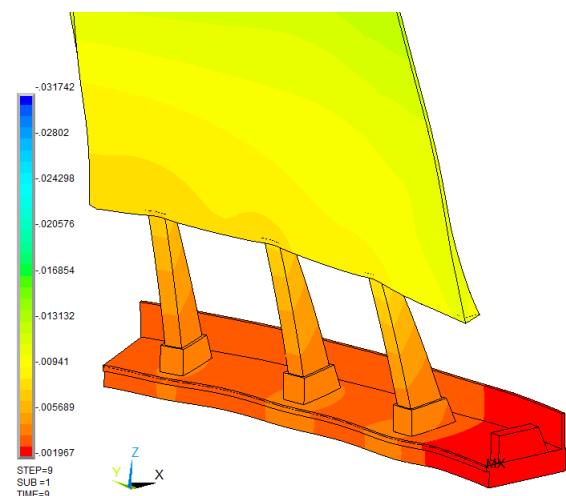
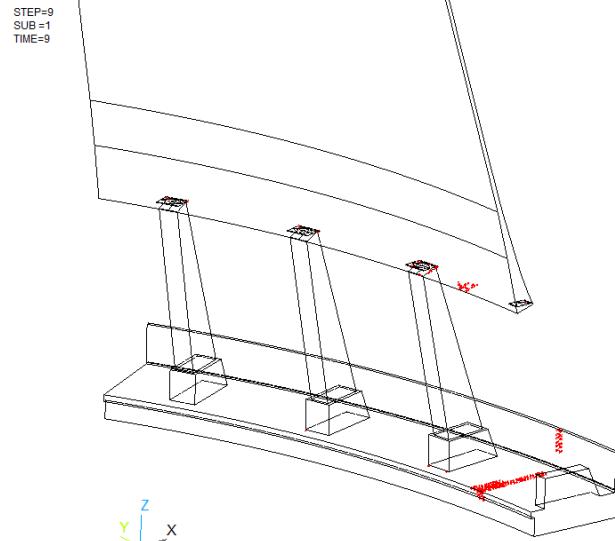


Перемещения UX, UY, UZ (мм) для узлов на высоте 63 м относительно основания в трех постановках. Синяя линия – "неразрывный" МРС контакт, красная линия – на жестком основании, зеленая пунктирная линия – стандартный контакт.

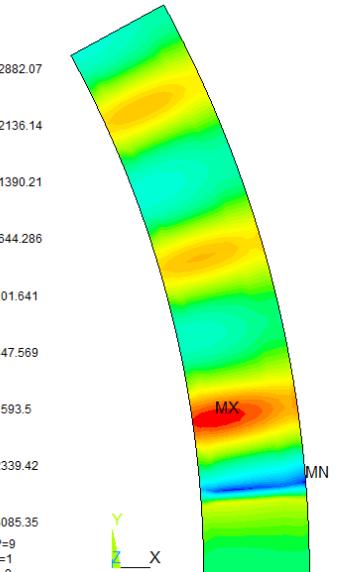
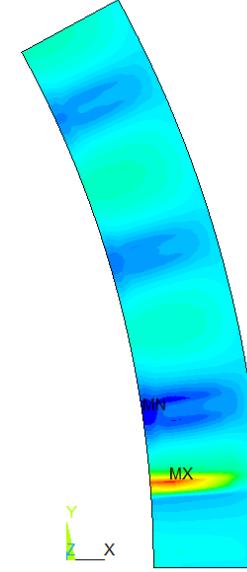
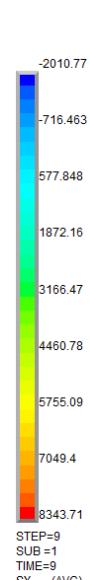


Расчетное определение НДС, прочности и устойчивости конструкции градирен.

Аварийная ситуация. *ПК ANSYS Mechanical*



Напряжение (tc/m^2) в
меридиональной арматуре
колонн. Удалена одна из
несущих колонн
min -16196 tc/m^2 , max -5 tc/m^2
(min -162.0 МПа, max -0.05
МПа)

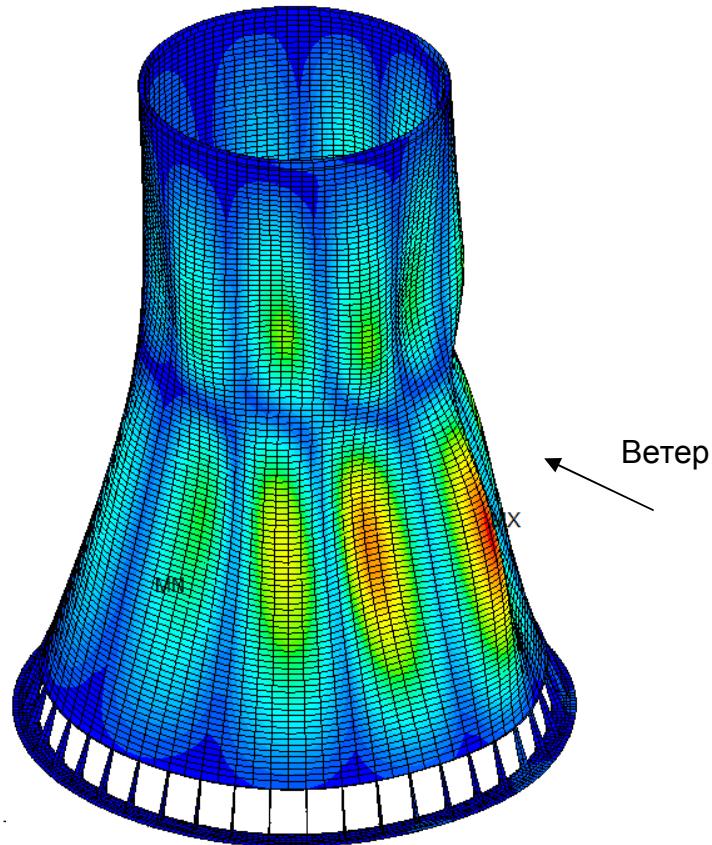


Напряжения (tc/m^2) в кольцевой
(от -20.1 МПа до 83.4 МПа) верхней
арматуре фундаментной плиты

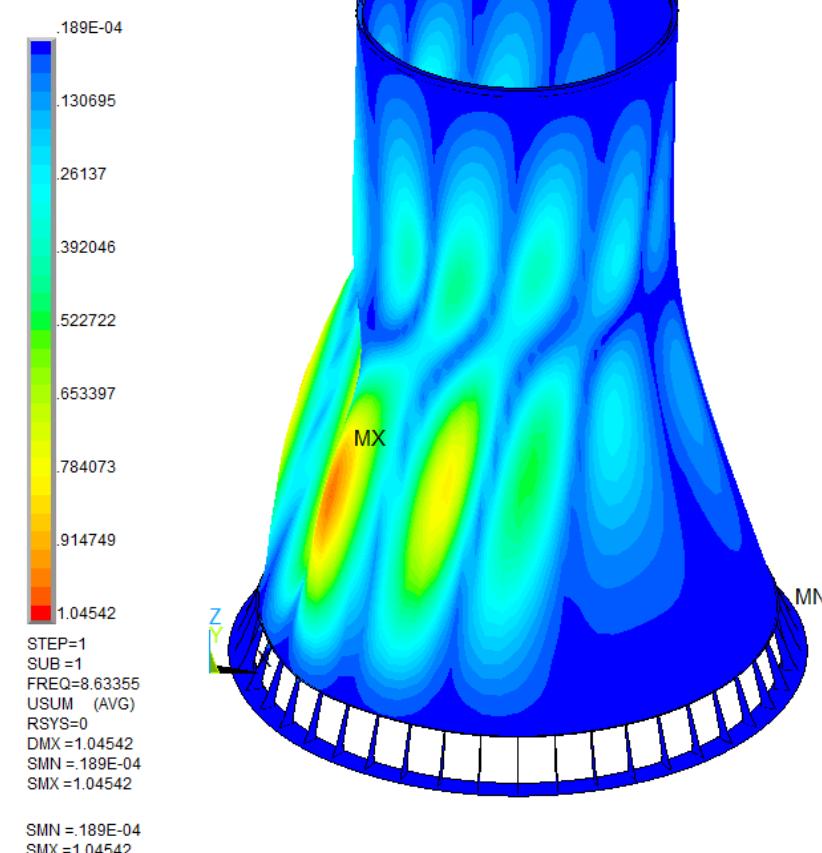
Напряжения (tc/m^2) в кольцевой
(от -28.8 МПа до 30.85 МПа) нижней
арматуре фундаментной плиты



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



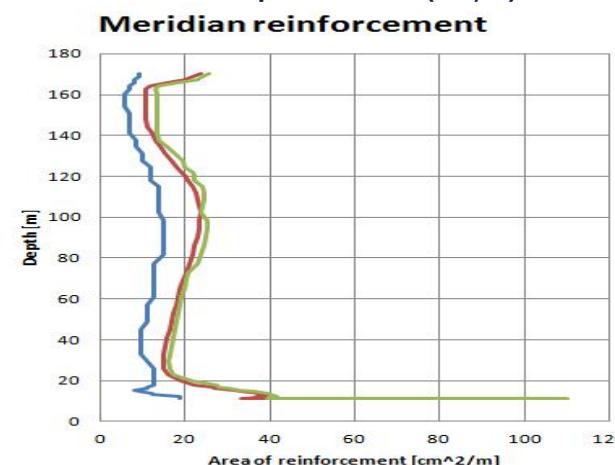
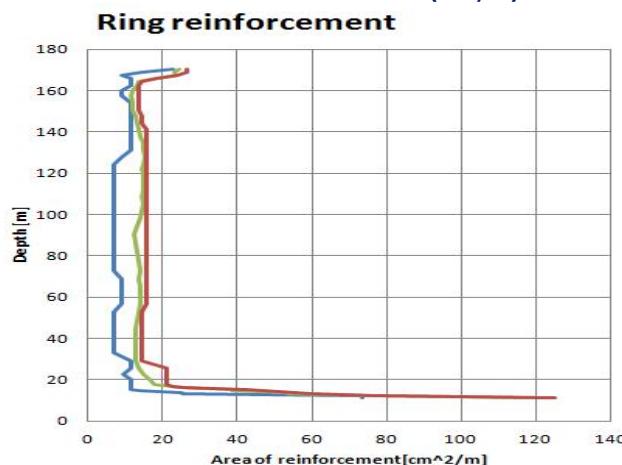
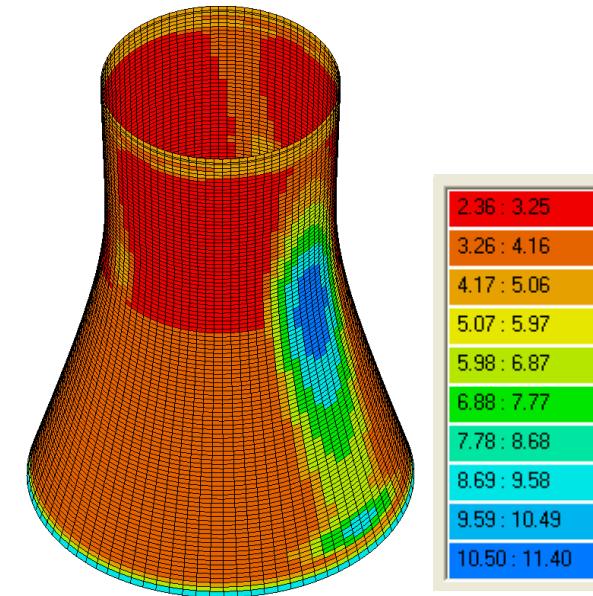
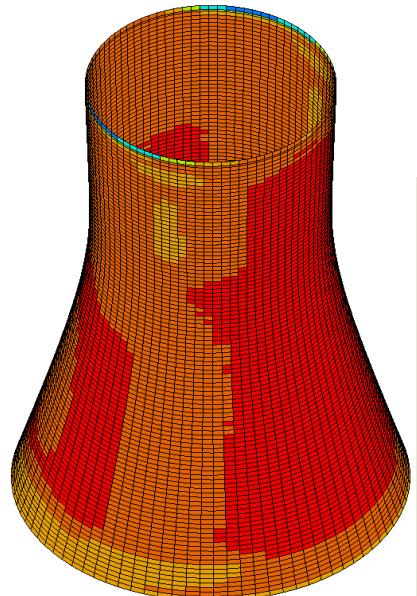
Форма потери устойчивости градирни от основного сочетания с проектным ветром. Расчетный запас по устойчивости 6.63



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*



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!