

УДК 621.9.011

МКЭ-АУДИТ НАПРЯЖЕНИЙ В ПИЗАНСКОЙ БАШНЕ ПОД МАКСИМАЛЬНЫМ НАКЛОНОМ.

СЕРИЯ «МКЭ ДЛЯ ПИЗЫ». ЧАСТЬ С.

Студенты гр.10305220 Шведова Д.Н., Роденя А.В.

Научные руководители – Довнар С.С., Лапука А.Д.

Белорусский национальный технический университет

Минск, Беларусь

В данной работе путем МКЭ-анализа выясняется напряженное состояние наклоненной Пизанской башни под действием силы тяжести (расчетный случай *LC* «*self-lean*»). Башня подвергается комбинированному воздействию осевого сжатия, перерезывающей силы и изгибающего момента. Башня моделируется в условиях максимального из зафиксированных у неё наклонов: $\alpha_T = 5,5^\circ$. В настоящее время наклон уменьшен на полтора градуса благодаря воздействиям итальянских инженеров на нижележащие грунты.

На рисунок 1 отражена техника нагружения башни – «включается» сила тяжести (под углом $\alpha_T = 5,5^\circ$ к оси башни) и последняя отклоняется. Рисунок 1 а, б, в показывают картины эквивалентных напряжений при вариации материалов башни и фундамента. Поля именно напряжений оказываются почти нечувствительными к смене материалов. Поэтому, некоторая имеющаяся неопределенность в механических свойствах фундамента и башни не принципиальна для картин напряжений.

Вариации материалов сильно влияют на деформационные перемещения. На рисунок 1, а отражено базовое сочетание материалов – мраморная башня на бетоне. Перемещения башни минимальны. Если два нижних бетонных диска счесть эквивалентными грунту (как и было при строительстве), то (рисунок 1, б) верхнее фундаментное кольцо опустится на 27,9 мм, а верхушка башни уйдет вправо на 92,5 мм. В третьем испытании материал всех солидов от базиса и выше был принят эквивалентным модельной кладке (рисунок 1, в). Положение фундамента не изменилось (27,5 мм). Отклонение башни возросло до 125,6 мм из-за её большей податливости.

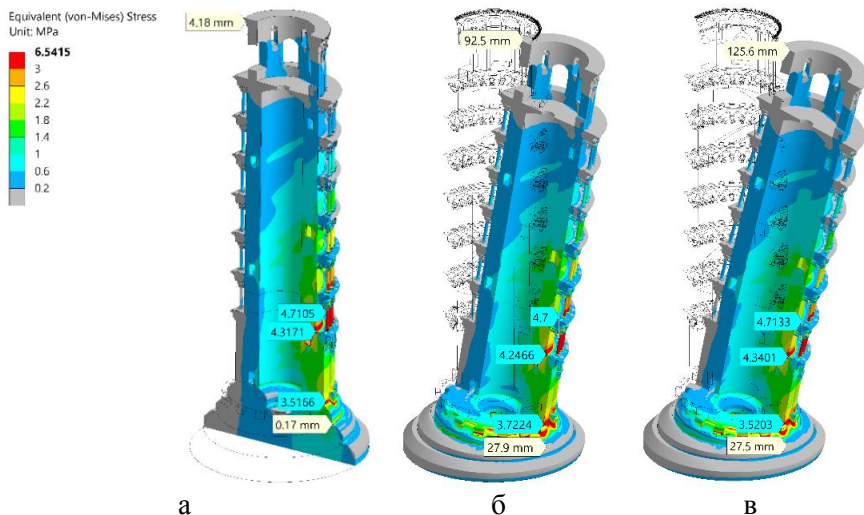


Рисунок 1 – Эквивалентные напряжения σ_e (МПа) и суммарные перемещения (мм) в ключевых точках башни при нагружении по LC «self-lean» ($\times 120$): а – «Мрамор на бетоне», б – «мрамор на грунте», в – модельная кладка на грунте.

Ориентация векторов главных напряжений дана на фоне сетки конечных элементов на рисунок 2, а. Видны почти исключительно только синие вектора минимального главного напряжения σ_3 . Красные и зеленые вектора главных напряжений σ_1, σ_2 практически отсутствуют. Следовательно, почти в каждом месте башни действует одноосное сжатие. Одноосное растяжение отсутствует, следовательно, стыки блоков не будут раскрываться. Не произойдет разборки сооружения, например, освобождения колонн.

Вместе с тем, нагружение сжатием весьма несимметрично для наклонной башни ($\alpha_T = 5,5^\circ$). Видно, что на внутренней стороне изгиба (справа) сжатие максимально. На внешней стороне изгиба (слева) вектора напряжения σ_3 почти отсутствуют. Это опасно для каменного сооружения. Таким образом, угол наклона башни $\alpha_T = 5,5^\circ$ можно считать предельным. При его превышении ожидаются растяжение и растрескивание конструкции.

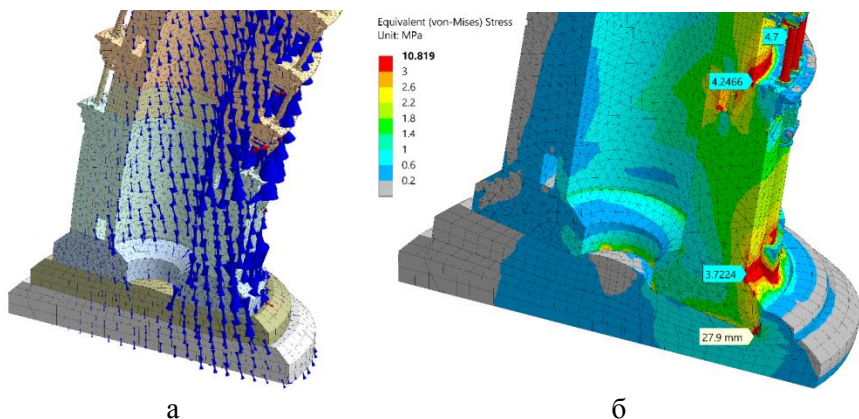


Рисунок 2 – Ориентация векторов главных напряжений $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ в сечении башни (а; $\times 5000$) и картина напряжения σ_e (МПа) в районе базиса и колоннады С1 (б; $\times 120$): а – «мрамор на бетоне», б – «мрамор на грунте». LC «self-lean»

На рисунок 2, б видно, как фундаментное кольцо деформирует грунт под башней. Перемещение края фундаментного диска составило 27,9 мм. Напряжения концентрируются на переходах профиля. Уровень эквивалентного напряжения $\sigma_e = 3,7224$ МПа наблюдается на стыке фундаментного кольца и базиса. Во внутреннем угле в стыке базиса и ствола выявлено напряжение 4,2466 МПа. Колонна сжата до напряжения 4,7 МПа.

Эти места концентрации напряжений находятся в правой части сечения башни, на внутренней стороне изгиба. Слева, на внешней стороне, напряжения малы и не превышают 0,2 МПа. Это нежелательно. Стыки составного сооружения не зафиксированы сжатием.

Самый нагруженный (сжатием) район башни представлен на рисунок 3. Картины напряжений на рисунок 3 а, б практически идентичны, несмотря на вариации материалов. Они относятся месту изгиба башни на уровне нижней колоннады. Рассмотрим рисунок 3, а. Здесь есть три места концентрации напряжений. Во-первых, регулярная сетка выявляет сильное сжатие колонны (4,7604 МПа). Во-вторых, вновь обнаруживается дуговой концентратор сжатия ДКС (дуга от 4,3398 до 3,5861 МПа). В-третьих, наблюдается

перегруженный район в глубине стены базиса 4,3398 - 2,9711 – 3,2104 МПа. Он обусловлен прохождением винтового хода вблизи ДКС. Поля сконцентрированных напряжений вокруг хода взаимодействуют с полями напряжений возле внутреннего угла «ствол – базис».

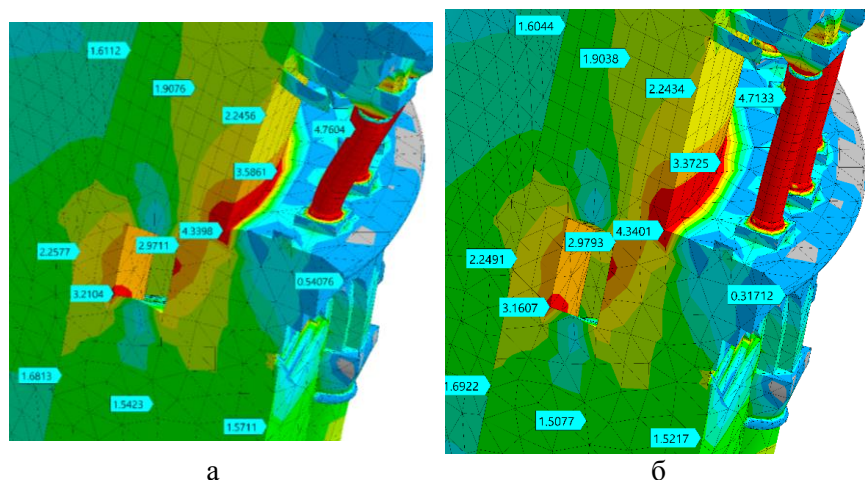


Рисунок 3 – Распределения напряжения σ_e (МПа) на переходе от ствола к базису: а – «мрамор на бетоне» ($\times 5000$), б – «кладка на грунте» ($\times 120$). LC “self-lean”.

Сжимающие напряжения распределены по толще стены базиса практически равномерно: 1,6813 – 1,5423 – 1,5711 МПа. Выше, в стене ствола, напряжения больше на наружном диаметре (1,6112 – 1,9076 – 2,2456 МПа). Стена ствола нагружена слабее (2,2456 МПа), чем соседствующая колонна (4,7604 МПа). Напряжения различаются в 2,11 раза.

В картине напряжений башни существенную роль играет колоннада *С1*. Поэтому на рисунок 4 сравниваются картины напряжений σ_e в присутствии и отсутствии колоннады. Исключение *С1* приводит к небольшому росту горизонтального отклонения верхушки башни – с 4,0089 мм до 4,2842 мм (в 1,07 раза). Колоннада слабо влияет на жесткость башни.

В полной модели (рисунок 4, а) сильнее всего напряжены колонны $C1$ со стороны изгиба (4,1123 МПа). На верхних ярусах колонны почти не нагружены (0,5732 МПа). Эквивалентные напряжения концентрируются также (2,7246 МПа) на переходе от мраморного базиса к мраморному же фундаментному кольцу. В ключевом районе башни (рисунок 4, б) за тремя скрытыми колоннами на стволе выявляется дуговой концентратор сжатия ДКС (4,0335 МПа).

В случае исчезновения $C1$ (рисунок 4, в), например, из-за повреждений колонн, напряжения на ключевом участке возрастут в $(5,0724/4,0335) = 1,256$ раз. Это изменение н.д.с. является существенным, но не принципиальным. Ствол наклонной башни способен справляться с гравитационной нагрузкой даже в случае отключения колонн $C1$.

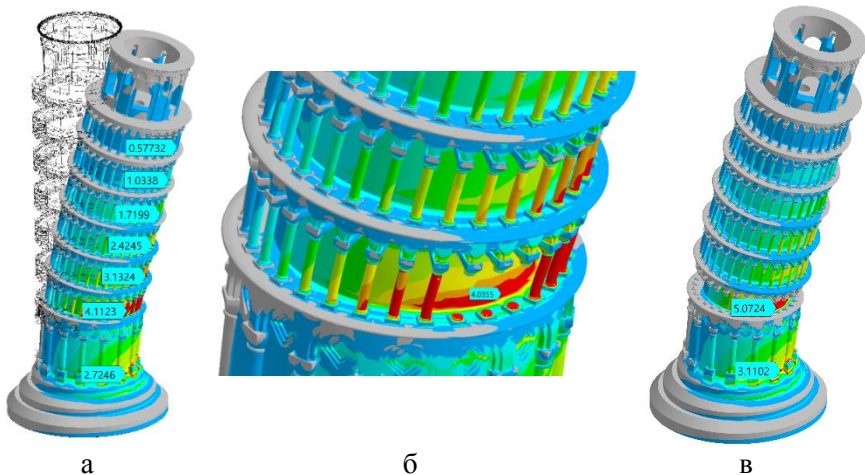


Рисунок 4 – Картины эквивалентного напряжения σ_e (МПа) под действием силы тяжести для полной модели (а), района колоннады $C1$ (б) и модели без $C1$ (в): LC «Self-lean»; $\times 3000$

Картина σ_3 на рисунок 5, а подтверждает, колонны первого яруса, находящиеся со стороны наклона, сильно сжаты (-4,7494 МПа). Они должны первыми подвергнуться разрушению при возрастании нагрузки на башню. Данные колонны были нагружены только до $\sigma_3 = -2,3785$ МПа при вертикальном положении башни.

Следовательно, моделируемый наклон $\alpha_T = 5^\circ 30'$ в ситуации увеличивает сжимающие напряжения в 1,99 раз (*двукратно*).

На противоположной наклону стороне башни сжимающие напряжения в колоннах приближаются к нулю (-0,11278 МПа). В случае дополнительного наклона напряжения здесь станут растягивающими. Тогда у колонны появится недопустимая подвижность, ведущая к обрушению конструкции. Итак, судя по картинам σ_3 , наклон $\alpha_T = 5^\circ 30'$ близок к предельно допустимому для Пизанской башни.

Более подробную картину сжатия в окрестности *C1* дает рисунок 5, б. Видно, что противоположные пары колонны нагружены по-разному: колонна справа сильно сжата (-4,455 МПа), а колонна слева (-0,3664 МПа) близка к нейтральному состоянию. Аналогичное сочетание сжатия и нейтральности наблюдается внизу базиса (-3,32 и -0,13255 МПа) и во второй колоннаде *C2* (-2.964 и -0,3256 МПа). Это суперпозиция осевого сжатия и изгиба.

Обратим внимание, что на одной и той же высоте башни (на первом ярусе) сжатию колонны *C1* до -4,455 МПа соответствует сжатие в стене ствола (на наружном диаметре) только до -2,2746 МПа. Получается, что стена подвергается примерно вдвое меньшим напряжениям сжатия, чем колонна (на одинаковой высоте).

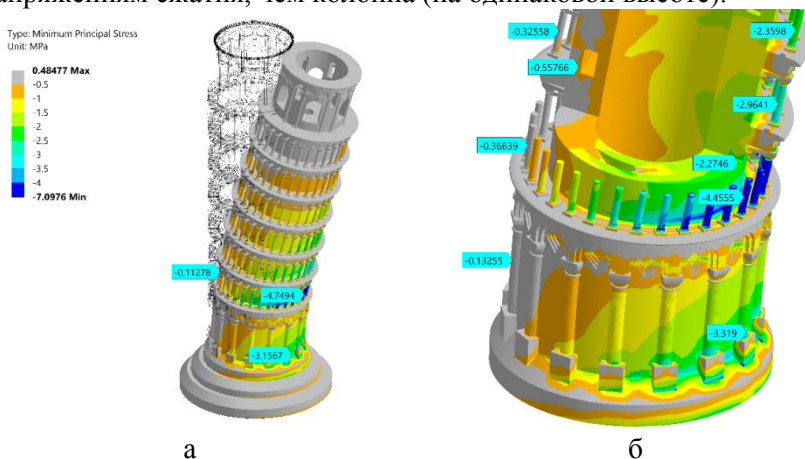
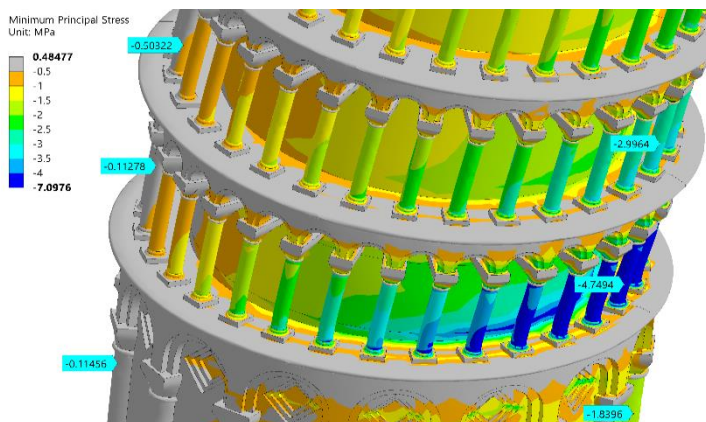
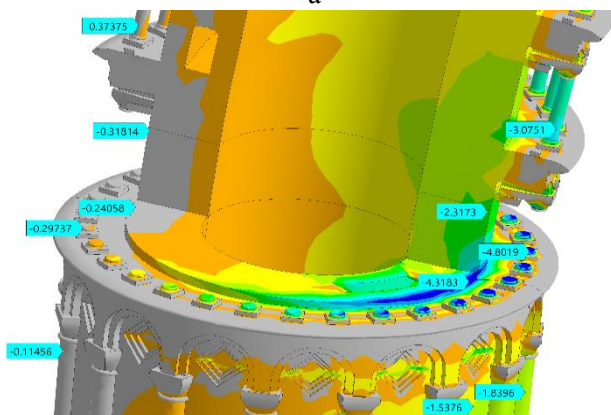


Рисунок 5 – Картины минимального главного напряжения σ_3 (МПа) для вида снаружи (а; $\times 3000$) и вида со скрытой половиной ствола (б; $\times 1500$): LC «Self-lean»

Подробные виды на район колоннады *С1* даны на рисунок 6 а и б. На рисунок 6, а видны прежде всего сжатые колонны (-4,7494 МПа). Если их скрыть, то на рисунок 6, б становится хорошо виден (-4,3183 МПа) концентратор ДКС. Визуально он связан с местом перехода ствола в базис. ДКС колонны *С1* выглядят одинаково опасными с точки зрения разрушений (напряжения в обоих местах близки: -4,3183 и -4,7494 МПа).



а



б)

*Рисунок 6 – Распределение напряжения σ_3 (МПа) в районе колоннады *С1* на видах снаружи (а; $\times 3000$) и в четвертном разрезе (б; $\times 1500$): LC «Self-lean»*

Картины σ_3 на рисунок 7 иллюстрируют два разных решения (с колоннадой *C1* и без нее). На рисунок 7, а колоннада работает в составе башни. Маркер -4,5973 МПа указывает на напряжения в ДКС, наблюдаемом сейчас снизу.

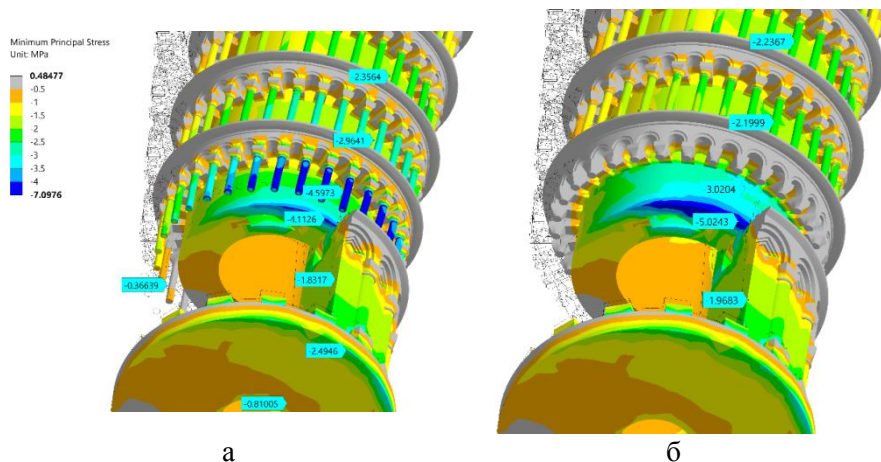


Рисунок 7 – Картины напряжения σ_3 (МПа) на видах снизу при напряженной колоннаде *C1* (а) и при её выключении из работы (б): LC «Self-lean»; $\times 3000$.

Для получения распределения σ_3 на рисунок 7, б колоннада *C1* была отключена. Минимальное главное напряжение достигло в ДКС уровня -5,0243 МПа. ДКС усилился только в 1,22 раза. Ствол является главной несущей системой Пизанской башни.

Выводы:

1. Барабан колонн Пизанской башни является более нагруженной несущей системой, чем ствол (до ~ 2 раз по сжимающим напряжениям).
2. Равномерного распределения веса между двумя несущими конструкциями НСБ (колонны) и НСТ (ствол) не достигается даже в виртуальном варианте вертикальной башни.
3. Самыми напряженными структурными деталями в башне являются колонны. Самой напряженной колоннадой является нижняя колоннада *C1*.

4. Концентрация напряжений наблюдается в кольцевом внутреннем угле на стыке базиса и ствола (дуговой концентратор сжатия ДСК).
5. Винтовой ход является концентратором напряжений. Его стенки нагружены сжимающими напряжениями в 1,5 – 2 раза выше, чем сплошные участки ствола.
6. При наклоне башни на максимальный угол $\alpha_T = 5,5^\circ$, сжимающие напряжения в колоннах CI снаружи от центра изгиба, близки к нулю. При дальнейшем наклоне появится опасность растрескивания швов и раскрытия накопленных трещин.
7. Наклон башни на максимальный угол $\alpha_T = 5,5^\circ$, увеличивает сжимающие напряжения в колоннах CI в два раза по сравнению со строго вертикальной установкой башни.
8. При наклоне башни на угол $\alpha_T = 5,5^\circ$ сжимающие напряжения в колоннах примерно вдвое выше, чем на наружном диаметре ствола. Ствол башни способен взять на себя нагрузку в случае выхода из строя колонн.

УДК 621.91.04

СИНТЕЗ И РЕАЛИЗАЦИЯ СХЕМЫ ОБРАБОТКИ КРУГОВОЙ ВИНТОВОЙ ПОВЕРХНОСТИ НА ТОКАРНО- ЗАТЫЛОВОЧНОМ СТАНКЕ

СТУДЕНТ ГР.10305219 ДОРОШКЕВИЧ Е.Г.

Научный руководитель – профессор Данилов В.А.

Белорусский национальный технический университет
Минск, Беларусь

Постановка задачи. Круговая винтовая поверхность (КВП) является рабочей поверхностью роторов одновинтовых насосов (рисунок 1) различного технологического оборудования: от нефтегазовой отрасли до пищевой промышленности [1].

Следует отметить, что отечественная промышленность не производит станки для обработки КВП, поэтому детали эксплуатируемого в стране импортного оборудования с такими поверхностями обычно приобретаются за рубежом. Для