

УДК 624.047

О.О. Ларін¹, О.І. Трубаєв¹, В.В. Юдаєв²
 НТУ «Харківський політехнічний інститут»¹
 ООО «АРТІЛЬ ПРОМАЛЬП АГРО»²

КОМП'ЮТЕРНИЙ АНАЛІЗ МІЦНОСТІ КОЛОН ЕЛЕВАТОРА ПРИ РІЗНИХ ВАРІАНТАХ НАВАНТАЖЕННЯ (частина №2)

Проведено аналіз міцності колон елеватора.

Ключові слова: елеватор, колона, напружено-деформований стан

А.А. Ларин, А.И. Трубаев, В.В. Юдаев
КОМПЬТЕРНЫЙ АНАЛИЗ ПРОЧНОСТИ КОЛОНН ЭЛЕВАТОРА ПРИ РАЗЛИЧНЫХ ВАРИАНТАХ НАГРУЖЕНИЯ (часть №2)

Проведен анализ прочности колонн элеватора.

Ключевые слова: элеватор, колонна, напряженно-деформированное состояние

O.O. Larin, O.I. Trubayev, V.V. Udayev
COMPUTER ANALYSIS OF STRENGTH OF ELEVATOR COLUMNS UNDER VARIOUS LOADING OPTIONS (part №2)

The strength analysis of the columns of the elevator is analyzed.

Keywords: elevator, column, stress-strain state

Постановка задачі. В роботі поставлена ціль – на основі конечно-елементного моделювання як об'ємного тіла (далі 3D-моделювання) оцінити напружено-деформоване стан колонни, при небагатриятних умовах експлуатації зернохранилища.

Схема приложення нагрукки на колонну К-1 при об'ємном моделюванні. Согласно действующим в настоящее время нормам при расчете прочности колонн сооружений по хранению зерна ДБН В.2.2-8-98 [4 пп. 5.3.3] колонны подсилосного этажа необходимо рассчитывать на максимальные усилия, передающиеся на них при разных схемах нагружения силосов (полная или частичная загрузка силосных корпусов). Поэтому нужно предусмотреть схемы нагружения, которые вызваны частичной загрузкой силосов зерном. Согласно монтажной схеме капители колонны [5] разработана схема приложення нагрукки на капитель (рис. 2, часть 1).

Значения давлений, действующих на колонну К-1 при разных схемах нагружения. Распределение давлений приведено в табл. 1.

1-й вариант - полная загрузка всех силосов (рассмотрен в части 1):

случай 1а – идеальная равномерная;

случай 1б – с учетом максимального монтажного эксцентриситета;

случай 1в – максимальная кратковременная при учете добавочного момента от ветра;

2-й вариант – случай 1б и 1 силос пустой (над участком 7);

3-й вариант – случай 1б и 2 силоса пустые (над участком 6 и 7);

4-й вариант – случай 1б и 3 силоса пустые (над участком 4,6 и 7).

Таблица 1

Варианты схем нагружения

| № | Величина давления, кгс/см ² | | | | | | |
|---|--|-------|-------|-------|-------|-------|------|
| | P1 | P2 | P3 | P4 | P5 | P6 | P7 |
| 2 | 36,63 | 44,29 | 28,99 | 47,39 | 51,86 | 38,42 | 1,47 |
| 3 | 36,63 | 44,29 | 28,99 | 51,86 | 51,86 | 1,47 | 1,47 |
| 4 | 36,63 | 44,29 | 28,99 | 1,47 | 51,86 | 1,47 | 1,47 |

Граничные условия для расчетной модели колонны К-1:

Для случаев, если некоторые силосы не загружены зерном, при учете длительного срока эксплуатации зернохранилища и наличия трещины, можно предположить, что раствор в швах

между колонной и опорными площадками воронок разрушен. Поэтому, с учетом малости давления веса воронок на колонну, граничные условия должны быть следующие:

- нижнее сечение колонны жесткозакреплено;
- верхнее сечение капители ограничено по горизонтальным перемещениям, только на участках со стеновой и зерновой нагрузкой;
- на участках верхнего сечения капители, где силосы пусты (давление равно $1,47 \text{ кгс/см}^2$, по табл.2) ограничений по перемещениям нет.

Анализ результатов расчета напряжений при частичной загрузке зерном силосов. Рассматривались 3 варианта нагружения:

- вариант 2 – один силос пустой + максимальный монтажный эксцентриситет;
- вариант 3 – два силоса пусты + максимальный монтажный эксцентриситет;
- вариант 4 – три силоса пусты + максимальный монтажный эксцентриситет.

Надо отметить, что реализацию данных вариантов не рекомендуется допускать на длительное время при эксплуатации зернохранилища. Величины давлений для всех трех случаев приведены в табл. 2 (часть 1).

На рис. 1 приведены суммарные перемещения в колонне К-1 для всех вариантов частичной загрузки силосов зерном. Сравнивая их, видно, что величина перемещений максимальна при 2-х пустых силосах с одной стороны (вариант 3), а с увеличением количества пустых силосов общая величина перемещений уменьшается. Распределение их неравномерно по высоте колонны. При увеличении неравномерности загрузки зерном максимум перемещений смещается с капители на середину колонны ближе к той ее части, где силоса загружены. Характер деформации колонны напоминает изгиб балки, что говорит о возможности возникновения на поверхности колонны растягивающих напряжений.

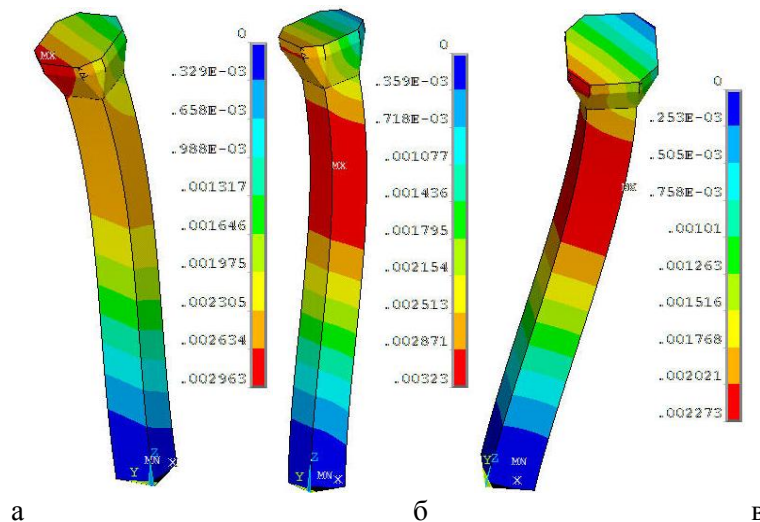


Рис. 1. Перемещения в колонне при частичной загрузке силосов зерном (а – вариант 2; б – вариант 3; в – вариант 4)

Рассмотрим напряжения в колонне при варианте нагружения 2. На рис. 2 а,б приведено распределение главных сжимающих напряжений в бетоне при шкале с максимумом по призмическому пределу прочности, при этом серым цветом показаны зоны, где главные напряжения превышают призмический предел прочности. Максимальные главные сжимающие напряжения в бетоне для варианта 2 наблюдаются на месте стыка капители и ребра колонны на левом ребре противоположном пустому силосу (рис.2в), и по величине нарушают не только критерий прочности (2, часть 1):

$$\sigma_{Г.С.}^b = 424 \text{ кгс/см}^2 > R_{np} = 135 \text{ кгс/см}^2,$$

но и превышают кубиковый предел прочности бетона на сжатие – 300 кгс/см^2 . При этом максимальное значение эквивалентных напряжений по Мизесу в арматуре тоже превышает критерий прочности (3, часть 1):

$$\sigma_i^a = 3658 \text{ кгс/см}^2 > R_a = 3400 \text{ кгс/см}^2.$$

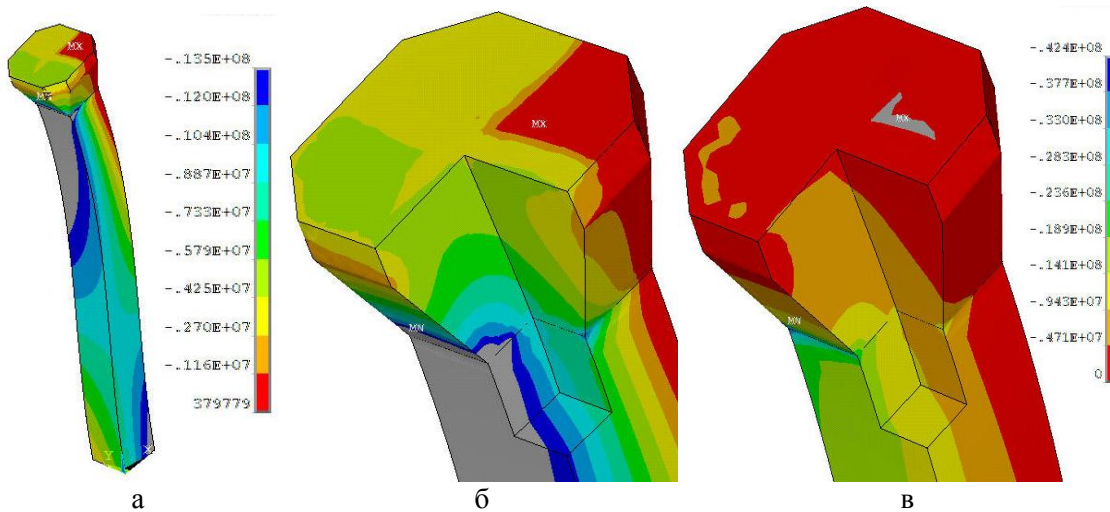


Рис. 2. Главные сжимающие напряжения в бетоне для варианта 2 (а – вид на колонну; б – вид на капитель; в – вид на капитель с максимальным значением)

Зона напряжений превышающих призмный предел прочности для варианта 2 (рис.2а,б) наблюдается на левой части колонны вдоль ребра противоположного пустому силосу, а также на месте стыка капители и этого ребра колонны. При этом эта зона захватывают значительную часть поверхности колонны около ребра и проникает в глубину стыка ребра и капители. Также, как и при случае 1в, есть зона напряжений превышающих призмный предел прочности и у основания колонны, на противоположном ребре. Как и при варианте 1, максимальные значения напряжений наблюдаются в точке на ребре, поэтому для оценки реальных напряжений были взяты максимальные значения в некоторой окрестности, в зоне превышения призмного предела прочности. Из рисунка 2в видно, что значения напряжений в этой зоне тоже значительно превышают призмный и кубиковый пределы прочности бетона:

$$\sigma_{Г.С.}^{\delta} = 290 \div 330 \text{ кгс/см}^2 > R_{np} = 135 \text{ кгс/см}^2.$$

В результате можно сделать вывод, что на стыке капители и ребра колонны при одном пустом силосе возможно разрушение и образование трещины в бетоне; арматура находится на пределе своей прочности.

Распределение главных растягивающих напряжений в бетоне для варианта 2 показано на рис.3 (серым цветом - зона сжимающих напряжений). Как видно их максимальная величина превосходит предел прочности на растяжение и нарушает критерий прочности :

$$\sigma_{Г.Р.}^{\delta} = 17 \text{ кгс/см}^2 > R_p = 10 \text{ кгс/см}^2.$$

Зона максимальных напряжений значительна, находится на верхней поверхности капители, вдоль границы стенового блока и опорной площадки свободной от зерна воронки. Надо отметить, что в этой зоне растягивающими являются все главные напряжения (см. рис 2в, серая зона). Это показывает, что в случае отсутствия зерна в одном силосе, есть реальная возможность возникновения трещины на капители сверху, смещенной относительно плоскости симметрии колоны на 50-150мм.

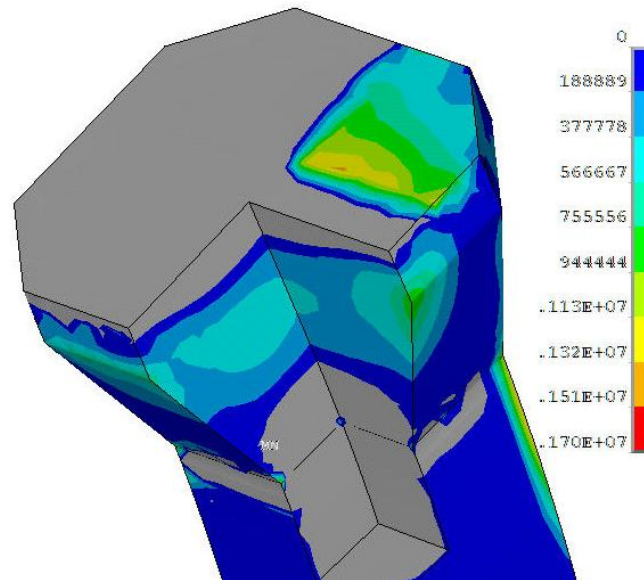


Рис. 3. Главные растягивающие напряжения для варианта нагружения 2

Рассмотрим напряжения в колонне при варианте нагружения 3. На рис. 4а,б приведено распределение главных сжимающих напряжений в бетоне при шкале с максимумом по призмочному пределу прочности, при этом серым цветом показаны зоны, где главные напряжения превышают призмочный предел прочности.

Максимальные главные сжимающие напряжения в бетоне для варианта 3 наблюдаются на месте стыка капители и ребер колонны на левой стороне противоположной 2-м пустым силосам (рис.4). Величина их превышает как призмочный предел прочности :

$$\sigma_{Г.С.}^{\delta} = 410 \text{ кгс/см}^2 > R_{np} = 135 \text{ кгс/см}^2,$$

так и кубиковый предел прочности бетона на сжатие – 300 кгс/см^2 . При этом максимальное значение эквивалентных напряжений по Мизесу в арматуре высокое, но не превышает предел текучести:

$$\sigma_i^a = 3000 \text{ кгс/см}^2 < R_a = 3400 \text{ кгс/см}^2.$$

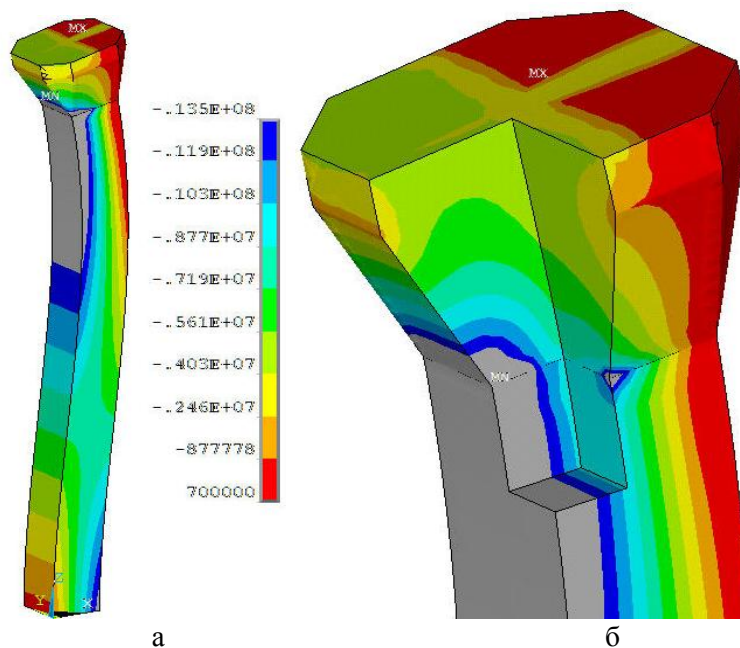


Рис. 4. Главные сжимающие напряжения в бетоне для варианта 3 (а – вид на колонну; б – вид на капитель; в – вид на капитель)

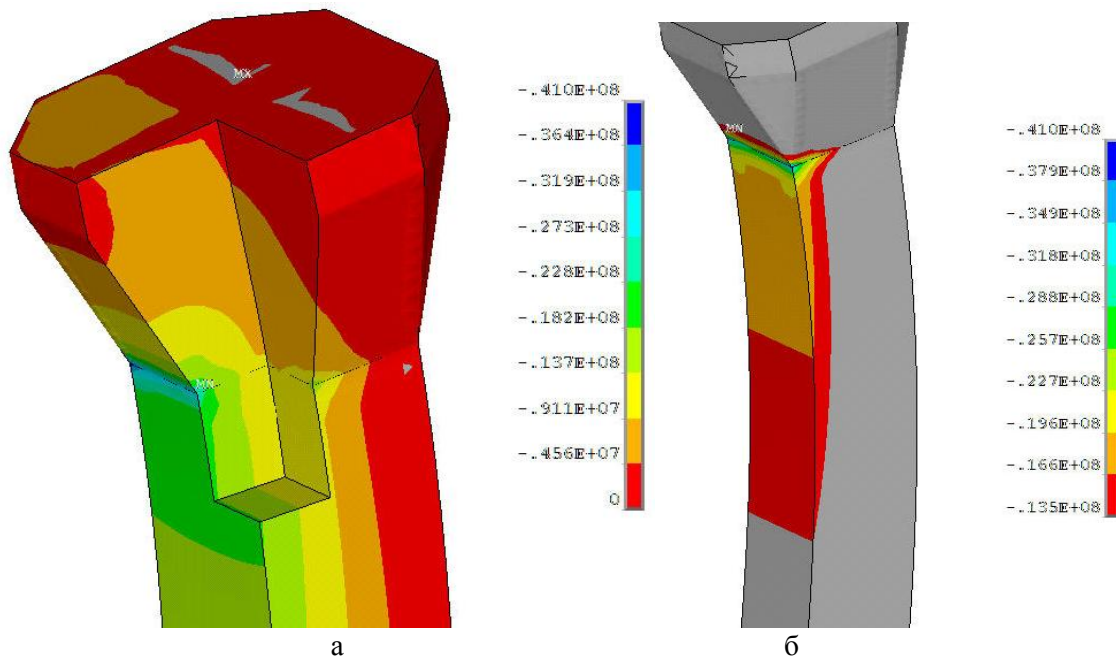


Рис. 5. Распределение главных сжимающих напряжений в бетоне для варианта 3, полученное с разной шкалой (а – от максимальных сжимающих напряжений до 0; б – от максимальных сжимающих напряжений до призмического предела прочности)

Зона сжимающих напряжений, превышающих призмический предел прочности для варианта 3 (рис. 5б) наблюдается на левой части колонны около поверхности капители противоположной пустым силосам и на месте стыка капители и этой части колонны. При этом эта зона проникает в глубину стыка колонны и капители, слева. Также есть зона напряжений превышающих призмический предел прочности у основания колонны (рис. 4а). Как и при варианте 2, максимальные значения напряжений наблюдаются в точке на ребре, поэтому для оценки реальных напряжений были взяты максимальные значения в зоне превышения призмического предела прочности. Из рис.5б видно, что значения напряжений в этой зоне тоже значительно превышают призмический и кубиковый пределы прочности бетона:

$$\sigma_{Г.С.}^{\sigma} = 290 \div 320 \text{ кгс/см}^2 > R_{np} = 135 \text{ кгс/см}^2;$$

В результате можно сделать вывод, что на стыке капители и колонны (противоположном пустым силосам) возможно разрушение бетона, хотя запас по прочности у арматуры есть.

Распределение главных растягивающих напряжений в бетоне для варианта 3 показано на рис.6а (серым цветом показана зона сжимающих напряжений). Как видно их максимальная величина значительно превосходит предел прочности на растяжение :

$$\sigma_{Г.Р.}^{\sigma} = 63,5 \text{ кгс/см}^2 > R_p = 10 \text{ кгс/см}^2 .$$

Зона напряжений превышающих предел прочности на растяжение очень велика (рис. 6б), расположена на боковой поверхности капители и колонны под пустыми силосами, а также вдоль границы стенового блока и опорных площадок свободных от зерна воронок. Надо отметить, что в этой зоне растягивающими являются все главные напряжения (см. рис 5а, серая зона), либо главные сжимающие напряжения близки к нулю. Фактически в колонне при двух пустых силосах наблюдается изгиб. Это говорит о возможности возникновения трещины, как на наклонной поверхности, так и на верхней поверхности капители. Данный вариант нагружения крайне опасен.

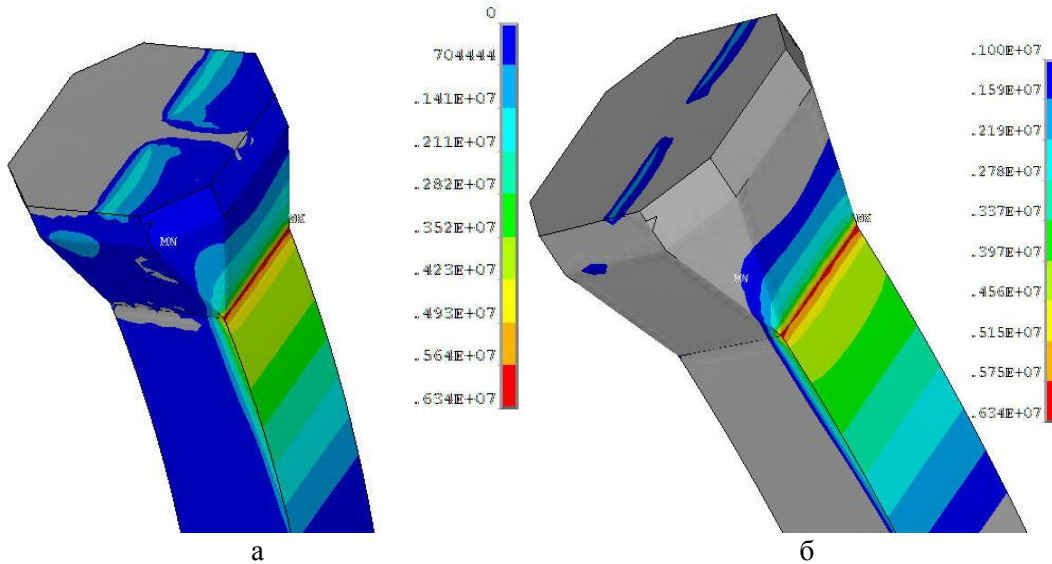


Рис. 6. Главные растягивающие напряжения для варианта нагружения 3 (а – весь диапазон; б – в диапазоне, превышающем предел прочности)

Рассмотрим напряжения в колонне при варианте нагружения 4. На рис. 7а приведено распределение главных сжимающих напряжений в бетоне при шкале с максимумом по призменному пределу прочности, при этом серым цветом показаны зоны, где главные напряжения превышают призменный предел прочности.

Максимальные главные сжимающие напряжения в бетоне для варианта 4 наблюдаются на месте стыка капители и ребра колонны на левой стороне под полным силосом (рис.2.16б). Величина их такова, что превышены призменный и кубиковый пределы прочности (1.3):

$$\sigma_{г.с.}^{\beta} = 339 \text{ кгс/см}^2 > R_{np} = 135 \text{ кгс/см}^2.$$

При этом максимальное значение эквивалентных напряжений по Мизесу в арматуре удовлетворяет критерию прочности (1.4):

$$\sigma_i^{\alpha} = 2715 \text{ кгс/см}^2 < R_a = 3400 \text{ кгс/см}^2.$$

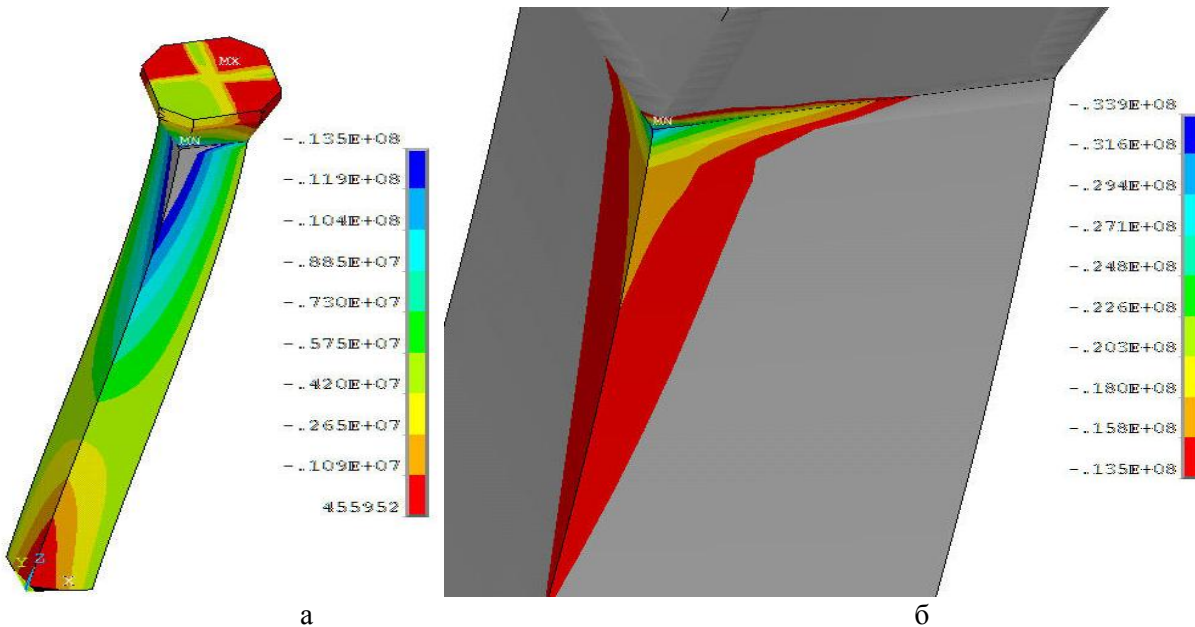


Рис.7 Главные сжимающие напряжения в бетоне для варианта нагружения 4 (а – вид на колонну; б – зона максимальных напряжений)

Зона сжимающих напряжений превышающих призменный предел прочности для варианта 4 (рис. 7б) наблюдается в узкой области стыка одного ребра колонны и капители, под полным

силосом слева. Максимальные значения напряжений наблюдаются в точке на ребре, поэтому для оценки реальных напряжений были взяты максимальные значения в зоне превышения призматического предела прочности. Из рисунка 7б видно, что значения напряжений в этой зоне превышают призматический предел прочности, но меньше кубикового предела прочности бетона на сжатие:

$$\sigma_{Г.С.}^{\delta} = 270 \div 290 \text{ кгс/см}^2 > R_{np} = 135 \text{ кгс/см}^2;$$

В результате можно сделать вывод, что на стыке капители и ребра колонны (под полным силосом) возможно разрушение бетона, при этом запас по прочности арматуры значительный.

Распределение главных растягивающих напряжений в бетоне для варианта 4 показано на рис. 8а (серым цветом показана зона сжимающих напряжений). Как видно их максимальная величина значительно превосходит предел прочности на растяжение и нарушает критерий прочности:

$$\sigma_{Г.Р.}^{\delta} = 97,9 \text{ кгс/см}^2 > R_p = 10 \text{ кгс/см}^2.$$

Зона напряжений превышающих предел прочности на растяжение велика (рис. 8б), расположена вдоль ребра колонны на правой части, противоположной полному силосу. Учитывая, что в таком месте значения напряжений искажены, возьмем их максимальные значения в некоторой окрестности от стыка ребра и капители:

$$\sigma_{Г.Р.}^{\delta} = 60 \text{ кгс/см}^2 > R_p = 10 \text{ кгс/см}^2.$$

Как видно превышение предела прочности очень существенно (в 6 раз). Фактически в колонне при трех пустых силосах есть возможность возникновения трещины вдоль ребра колонны около капители.

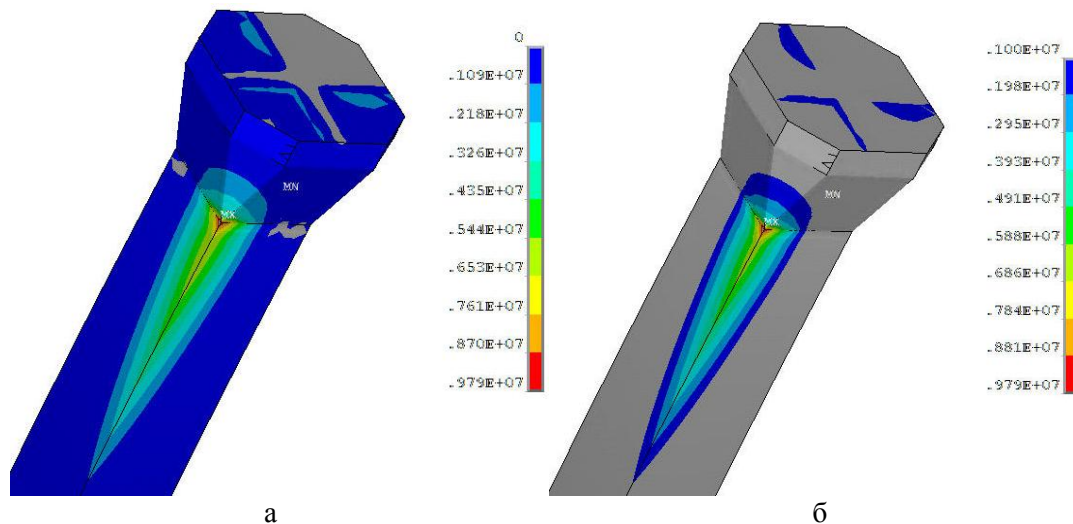


Рис. 8. Главные растягивающие напряжения для варианта нагружения 4 (а – весь диапазон; б – в диапазоне, превышающем предел прочности)

Выводы

- 1) В случаях, когда силоса частично загружены зерном, в районе стыка колонны с капителью и у основания колонны есть участки, где превышает призматический предел прочности.
- 2) При всех вариантах загрузки силосов в месте стыка капители с основной частью колонны наблюдается превышение призматического предела прочности, а при вариантах нагружения, когда пустыми являются 1 или 2 силоса, превышен кубиковый предел прочности бетона.
- 3) На капители при частичной загрузке силосов действуют значительные растягивающие напряжения и есть условия для возникновения трещины. Места расположения этих участков совпадают с зонами, где обнаруживаются трещины при проведении ремонтов

Рецензенты

Гринев Владимир Борисович -заведующий кафедрой строительной механики Харьковского национального университета строительства и архитектуры, д.т.н., профессор

Хавин Валерий Львович -заведующий кафедрой механики сплошных сред и сопротивления материалов НТУ «Харьковский политехнический университет», к.т.н., профессор

Статья надійшла до редакції 20.06.2018