

## ДИНАМИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ КОНСТРУКЦИИ БУНКЕРА МЕТОДОМ КОНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

Банников Д.О.<sup>1</sup>, Гуслистая А.Э.<sup>2</sup>

*(Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, г. Днепропетровск  
<sup>2</sup>Государственное высшее учебное заведение «Приднепровская государственная академия строительства и архитектуры», г. Днепропетровск)*

В настоящее время наблюдается устойчивая тенденция ко все большей детализации расчетных моделей различных строительных конструкций. С одной стороны это связано со стремлением уточнить имеющиеся представления об их работе, с другой стороны - максимально полно учесть весь спектр возможных режимов их работы. Технически этому способствует постоянно возрастающая мощность и быстроедействие современной компьютерной техники, применяемой для проведения расчетов и обработки получаемых результатов.

Наиболее популярным методом, используемым инженерами при этом, является метод конечных элементов (МКЭ), аббревиатура которого стала уже своеобразным символом современного компьютерного проектирования [1 - 3]. Между тем, все чаще и чаще встречаются публикации, посвященные одной из наиболее важных особенностей МКЭ - анализу сходимости результатов.

В отношении получаемых статических характеристик конструкции, таких как напряжения, имеются серьезные опасения отсутствия их сходимости при сгущении конечно-элементной (КЭ) сетки в так называемых «особых точках». Это явление получило название сингулярности по напряжениям. Для его обхода предлагаются самые разнообразные приемы и технологии (см., например, [4 - 7]). Однако проблема остается достаточно серьезной.

Не менее важными характеристиками конструкции являются ее динамические параметры - в первую очередь, частоты колебаний. Оценке их сходимости при сгущении КЭ сетки и посвящена данная статья.

В качестве объекта для проведения исследований был выбран класс конструкций, достаточно хорошо известный авторам по ряду предыдущих исследований [8 - 10], - вертикальные жесткие стальные емко-

сти для сыпучих материалов. Основные особенности их конструкции и работы достаточно детально представлены в данных работах.

В качестве метода исследований был выбран МКЭ в форме метода перемещений с практической реализацией на базе проектно-вычислительного комплекса SCAD for Windows [11]. Этот комплекс является достаточно универсальным и многозадачным. Авторы использовали его для решения множества теоретических и практических задач на протяжении уже более 10 лет, в том числе и при исследовании работы емкостных конструкций.

На первом этапе исследований выполнялась оценка собственных частот колебаний конструкции бункера для угля, модель которого создавалась согласно расчетам, приведенным в пособии [12]. Бункер представляет собой двояксимметричное в плане сооружение с габаритными размерами 6х6 м при общей высоте 6,2 м. КЭ модель приведена на рис. 1.

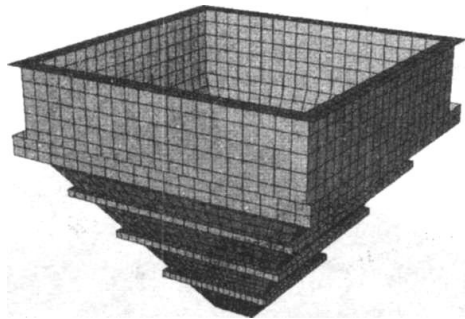


Рис. 1. Модель бункера для угля

Динамический анализ выполнялся на серии постепенно сгущающихся КЭ сеток. В результате определялся спектр собственных частот. Его сопоставительные количественные значения для низших 10 частот приведены в табл. 1.

Как видно из полученных результатов, отчетливо прослеживается достаточно хорошая сходимость, - даже при использовании относительно грубой КЭ сетки. ....

На втором этапе исследований рассматривалась несимметричная конструкция. Выполнялась оценка собственных частот колебаний конструкции бункера для агломерата комбината «Криворожсталь», модель которого создавалась согласно результатам проведенных обследований

и оценки технического состояния, приведенным в отчете [13]. Бункер имеет габаритные размеры в плане 15x18 м при общей высоте порядка 10 м. КЭ модель приведена на рис. 2.

Таблица 1

Собственный частотный спектр модели бункера для угля

| Частота, Гц | Размер КЭ сетки, мм |       |       |       |
|-------------|---------------------|-------|-------|-------|
|             | 300                 | 150   | 75    | 32    |
| 1-я         | 10,77               | 10,51 | 10,39 | 10,34 |
| 2-я         | 11,35               | 11,19 | 11,13 | 11,10 |
| 3-я         | 11,35               | 11,19 | 11,13 | 11,10 |
| 4-я         | 11,54               | 11,41 | 11,36 | 11,34 |
| 5-я         | 14,14               | 14,15 | 13,80 | 13,76 |
| 6-я         | 14,35               | 14,87 | 14,32 | 14,45 |
| 7-я         | 15,13               | 14,87 | 14,75 | 14,71 |
| 8-я         | 15,14               | 15,22 | 15,16 | 15,17 |
| 9-я         | 15,52               | 15,32 | 15,18 | 15,17 |
| 10-я        | 15,52               | 15,32 | 15,26 | 15,24 |

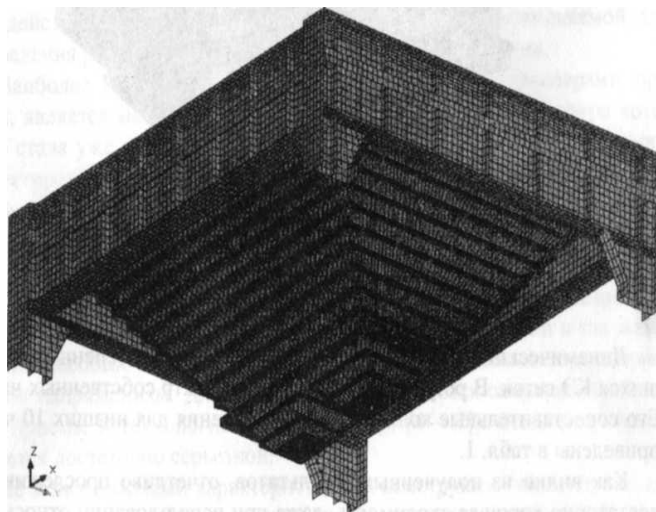


Рис. 2. Модель бункера для агломерата

В публикации [14] были описаны ряд дефектов в конструкции бункера, обнаруженные при его обследовании, а также выполнено их моделирование: вариант № 1 - отверстие размером до 0,5 м в стенке, вариант № 2 - отсутствие куска ребра длиной 1,5 м, вариант № 3 - отрыв

«седловидной» рамы от стенок. При этом сопоставлялись значения собственных частот для этих случаев. Расчет выполнялся на крупной КЭ сетке, создать которую позволяли имеющиеся в то время расчетные мощности. Полученные результаты приведены в табл. 2. В работах [8, 10] отражены результаты расчетов для данной конструкции, полученные на более мелкой КЭ сетке. Они включены в табл. 2. Результаты расчетов для более мелкой КЭ сетки, полученные в ходе настоящих исследований, также, приведены в табл. 2.

Таблица 2

Собственный частотный спектр модели бункера для агломерата

| Вариант          | Частота, Гц | Размер КЭ сетки, мм          |                               |       |
|------------------|-------------|------------------------------|-------------------------------|-------|
|                  |             | 1000 (по данным работы [14]) | 250 (по данным работ [8, 10]) | 75    |
| без поврежденных | 1-я         | 10,83                        | 10,14                         | 10,05 |
|                  | 2-я         | -                            | 10,50                         | 10,42 |
|                  | 3-я         | -                            | 15,02                         | 14,89 |
| № 1              | 1-я         | 9,88                         | 9,48                          | 9,38  |
|                  | 2-я         | -                            | 10,11                         | 9,97  |
|                  | 3-я         | -                            | 15,02                         | 14,86 |
| № 2              | 1-я         | 10,16                        | 9,66                          | 9,54  |
|                  | 2-я         | -                            | 10,23                         | 10,14 |
|                  | 3-я         | -                            | 14,39                         | 14,28 |
| № 3              | 1-я         | 7,67                         | 7,17                          | 7,05  |
|                  | 2-я         | -                            | 8,52                          | 8,43  |
|                  | 3-я         | -                            | 12,11                         | 11,96 |

Как видно из приведенной таблицы, как и в предыдущем случае, наблюдается достаточно устойчивая сходимость результатов.

На третьем этапе исследований выполнялось сопоставление результатов численных расчетов с экспериментальными данными. Описание сущности и постановки экспериментальных исследований приведено в работах [9, 15,16]. Экспериментальные конструкции представляли собой малоразмерные емкости (0,8x0,8 м в плане при общей высоте около 1,2 м). Всего было испытано две емкости, отличавшиеся толщиной стенки (4 и 2 мм). КЭ модели приведены на рис. 3.

В работе [9] представлены результаты, полученные в ходе численного моделирования на сетке с крупностью КЭ 30 мм, а также спектр собственных частот по данным выполненных экспериментальных ис

следований (табл 3 и 4). Результаты, полученные для более мелкой КЭ сетки, а в ходе настоящих исследований, также приведены в табл. 3 и 4.

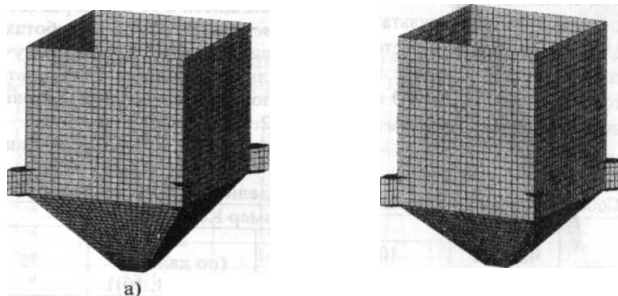


Рис. 3. Модели экспериментальной емкости № 1(а) и № 2 (б)

Таблица 3

Собственный частотный спектр модели  
Экспериментальной емкости № 1

| Частота,<br>Гц | Расчет при размере КЭ сетки,<br>мм |      |      | Экс-<br>перимент |
|----------------|------------------------------------|------|------|------------------|
|                | 30                                 | 15   | 7,5  |                  |
| 1-я            | 19,0                               | 19,0 | 19,0 | 19,7             |
| 2-я            | 25,6                               | 25,5 | 25,5 | 26,3             |
| 3-я            | 36,7                               | 36,7 | 36,7 | 38,5             |
| 4-я            | 40,3                               | 39,6 | 39,5 | 44,6             |

Заметим, что в эксперименте не отслеживались кратные частоты и соответственно при расчетах из полученного спектра они также были удалены.

В целом, анализируя данные таблиц 3 и 4 видно, что сходимость значений частот собственных колебаний является достаточно хорошей и неплохо согласуется с экспериментальными данными, в особенности для низших частот.

### **Выводы**

Таким образом, на основе выполненных исследований следует констатировать:

1. Использование МКЭ в форме метода перемещений позволяет получить довольно хорошую сходимость по величинам частот собственных колебаний рассчитываемых конструкций. При этом получаемые результаты являются достаточно достоверными, поскольку неплохо согласуются с экспериментальными значениями, измеренными на натурных установках. Погрешность при этом не превышает 20 % для нескольких первых низших частот, имеющих наиболее важное практическое значение.

Таблица 4

Собственный частотный спектр модели  
экспериментальной емкости № 2

| Частота, Гц | Расчет при размере КЭ сетки, мм |      |      | Эксперимент |
|-------------|---------------------------------|------|------|-------------|
|             | 30                              | 15   | 7,5  |             |
| 1-я         | 9,7                             | 9,7  | 9,7  | 8,2         |
| 2-я         | 13,2                            | 13,1 | 13,1 | 11,2        |
| 3-я         | 18,3                            | 18,3 | 18,3 | 17,3        |
| 4-я         | 25,1                            | 24,4 | 24,4 | 22,3        |
| 5-я         | 26,8                            | 26,8 | 26,8 | 39,4        |

2. Размер КЭ, обеспечивающего необходимую точность результата, следует принимать равным не более 1/10 габаритного размера конструкции.

3. Численные расчеты с применением МКЭ могут служить основой для проведения динамической интегральной диагностики строительных конструкций во время эксплуатации. Для этого вполне возможно использовать методику, разработанную и изложенную в работе [17]

## SUMMARY

**The questions of convergence of the results of dynamic analysis using finite element method are studied. The analysis is performed by using several designs of bunker tanks for bulk materials.**

International Journal of Offshore and Polar Engineering. - Vol. 12, No 1. - 2002. -CD-R.

5. Maddox, C. J. Hot-Spot Stress Design Curves for fatigue Assessment of Welded Structures [Текст] / C. J. Maddox // International Journal of Offshore and Polar Engineering. - Vol. 12, No 2. - 2002. - CD-R.

6. Nazari, A. Application of the Hot Spot Stress Method to the Fatigue Assessment of Hollow Section Shiploader Boom Connections [Текст] / A. Nazari, J. Du-rack // Proc. of 5<sup>th</sup> Australasian Congress on Applied Mechanics ACAM-2007. -Brisbane. - 2007. - CD-R.

7. Bard, W. T. Fatigue Assessment of Aluminum Ship Details by Hot-Spot Stress Approach [Текст] / W. T. Bard, W. Xiaozhi, B. Stig // ABS Technical Papers. 2007.-P. 255 -271.

8. Банников, Д. О. Расчет пирамидально-призматических бункеров методом конечных элементов / Д. О. Банников, М. И. Казакевич. - Днепропетровск: Наука и образование, 2003. - 150 с.

9. Банников, Д. О. Сипучий матеріал в шнісній конструкції/Д. О. Банніков. - Дніпропетровськ: Моноліт, 2009. - 172 с.

10. Банников, Д. О. Вертикальные жесткие стальные емкости: современные концепции формообразования / Д. О. Банников. - Днепропетровск: Монолит, 2009.- 186 с.

11. Карпиловский, В. С. SCAD для пользователя [Текст] / В. С. Карпилов-ский, Э. 3. Криксунов, А. В. Перельмутер, М. А. Перельмутер, А. Н. Трофим-чук. - К.: ВВП Компас, 2000. - 332 с.

12. Руководство по расчету и проектированию железобетонных, стальных и комбинированных бункеров [Текст] / Ленпромстройпроект. - М.: Стройиздат, 1983.-200 с.

13. Криворожский государственный горно-металлургический комбинат «Криворожсталь». Доменная печь № 9. Бункерная эстакада. Обследование и оценка технического состояния металлоконструкций: Отчет о НИР, в 3 г. [Текст] / ОАО «Проектный институт «Днепрпроектстальконструкция». - Днепропетровск, 1997. - 226 с.

14. Банников, Д. О. Мониторинг стальных бункеров [Текст] / Д. О. Банников // 36. наук, робіт ДНУЗТ: Будівництво. - Дніпропетровськ: ДНУЗТ. - 2002. -Вип. 11.-С. 38-41.

15. Банников, Д. О. Планирование и проведение исследований по экспериментальному изучению сыпучих материалов в емкостных конструкциях [Текст] / Д. О. Банников // Сб. научн. трудов «Строительство, материаловедение, машиностроение», серия: Инновационные технологии жизненного цикла объектов жилищно-гражданского, промышленного и транспортного назначения. - Днепропетровск: ПЕАСА. - 2008. - Вип. 47. - С. 40 - 52.

16. Банніков, Д. О. Експериментальні дослідження динамічних властивостей сталевих емісних конструкцій для сипучих вантажів [Текст] / Д. О. Банніков // Підійомно-транспортна техніка. - 2008. - № 4. - С. 79 - 88.

17. Еорохов. Е. В. Аэродинамика электросетевых конструкций [Текст] / Е. В. Еорохов, М. И. Казакевич. С. Н. Шаповалов. Я. В. Пазим / Пол ред. Е. В. Еорохова. М. И. Казакевича. - Донецк, 2000. - 336 с.