

УДК 624.04

**РЕАЛИЗАЦИЯ МЕТОДА КОНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ В  
ПРОГРАММНОМ КОМПЛЕКСЕ МАТЛАВ НА ПРИМЕРЕ  
ПОСТРОЕНИЯ ГРАДИРЕН ГИПЕРБОЛИЧЕСКОГО И  
ПИРАМИДАЛЬНОГО ТИПА**

*Шейн Александр Иванович,*

*Пензенский государственный университет архитектуры и строительства,  
г. Пенза,*

*доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Механика».*

*Мальков Артем Игоревич,*

*Пензенский государственный университет архитектуры и строительства,  
г. Пенза,*

*аспирант.*

**Аннотация**

Рассмотрены виды башенных градирен и построение расчетной модели для метода конечных элементов. Представлены возможности программного комплекса MATLAB для реализации алгоритма метода конечных элементов на примере построения расчетной модели градирен гиперболического и пирамидального типа. Описываются принципы работы с матрицами в MATLAB. Предложена блок-схема расчета градирен методом конечных элементов.

**Ключевые слова:** градирня, расчет методом конечных элементов, MATLAB.

**REALIZATION OF THE FINITE ELEMENT METHOD IN THE MATLAB  
SOFTWARE ON THE EXAMPLE OF CONSTRUCTING HYPERBOLIC  
AND PYRAMIDAL COOLING TOWERS**

*Shein Alexander Ivanovich,*

*Penza State University of Architecture and Construction, Penza,*

*Doctor of Sciences, Professor, Head of the department "Mechanics".*

*Malkov Artem Igorevich,*

*Penza State University of Architecture and Construction, Penza,*

*post-graduate student.*

### **Abstract.**

The types of tower cooling towers and the construction of a computational model for the finite element method are considered. The possibilities of the MATLAB software package for the implementation of the finite element method algorithm are presented on the example of constructing a computational model of hyperbolic and pyramidal type cooling towers. The principles of working with matrices in MATLAB are described. A block diagram for calculating cooling towers by the finite element method is proposed. Keywords: cooling tower, finite element analysis, MATLAB.

**Введение.** Градирня – это башенная конструкция предназначена для охлаждения воды в системах обратного водоснабжения энергетических объектов, а так же крупных предприятий промышленности. Вода применяется в связи с организацией замкнутого цикла при охлаждении оборудования в целях предохранения его от быстрого разрушения под влиянием высоких температур. От устойчивой работы градирен зависит безопасность системы охлаждения технологического цикла, а, следовательно, и безопасность всего энергетического комплекса [1].

Башенные градирни представляют собой полую башню. Они бывают пирамидального и гиперболического типа. Конструктивно башни представляют собой высокие конструкции со стальным каркасом гиперболического, конического или пирамидального очертания. В сооружениях соблюдается соотношение основания к высоте в диапазоне от 1/1,15 и 1/1,3. Градирни представлены на рисунках 1 и 2.

Важно отметить, что металлические градирни представляют собой циклически-симметричные системы, состоящие из стержневых элементов, для

расчета которых рационально использовать метод конечных элементов реализованный на базе программного комплекса MATLAB.



Рисунок 1 – Градирни пирамидального сечения



Рисунок 2 – Градирни гиперболического сечения



Расчетная модель состоит из стержневых конечных элементов, количество элементов системы вычисляется по формуле  $2 \cdot n \cdot z$ . Соответственно количество перемещений определяется формулой  $6 \cdot n \cdot (z+1)$ .

После формирования расчетной модели переходим к решению поставленной задачи.

Решение данной задачи выполняется в программном комплексе MATLAB.

MATLAB – среда для решения теоретических и прикладных задач с применением высокоуровневого языка программирования для выполнения инженерных и научных вычислений.

Программный комплекс MATLAB – представляет собой матричную систему, ориентированную на численные расчеты, в ней удачно реализованы принципы работы с многомерными массивами и упрощенны средства для создания циклов. Программный комплекс MATLAB стал мировым стандартом по созданию программ для решения математических задач. Благодаря тому, что программный комплекс ориентирован на численные методы в матричных системах, он как нельзя лучше подходит для решения задач строительной механики с применением метода конечных элементов.

В программном комплексе задачи решаются по двум основным алгоритмам:

1. Непосредственным набором алгоритма решения задачи в одном диалоговом окне;
2. Написание программного алгоритма для решения обширных задач – алгоритм состоит из процедуры (основного файла) и процедуры-функции (записывается в отдельном файле). В пакете реализована комплексная арифметика, вычисления производятся с двойной точностью, базовым элементом является массив данных. Проекты реализуются в написании программы, на языке программирования MATLAB.

Для решения поставленной задачи в программном комплексе MATLAB удобно использовать функция проект, с выполнением поэтапного разбиения для реализации метода конечных элементов.

В основном файле прописываются основные исходные данные и последовательное вычисление процедур-функций с выводом искомых величин в главный файл. Количество процедур-функций не ограничивается, благодаря чему возможна реализация алгоритмов любых размеров. Что является конкурентным преимуществом по сравнению с программным комплексом MathCAD.

Для реализации метода конечных элементов разработана блок-схема представленная на рисунке 4.

Алгоритм построения математической модели следует начинать с вводимых исходных данных в Модель через функции “Input” (введите исходные данные), такие как:

- радиус описанного круга основания  $R$ ;
- количество ребер градирни -  $n$ ;
- угол наклона ребер -  $\alpha$ ;
- количество ярусов -  $z$ ;
- высота яруса -  $H$ ;
- геометрические и физические характеристики элементов конструкции.

Первым прописываем алгоритм определения радиусов каждого яруса в зависимости от угла наклона ребра к изменению высоты расположения яруса.

Второй алгоритм определяет длины горизонтальных и вертикальных элементов.

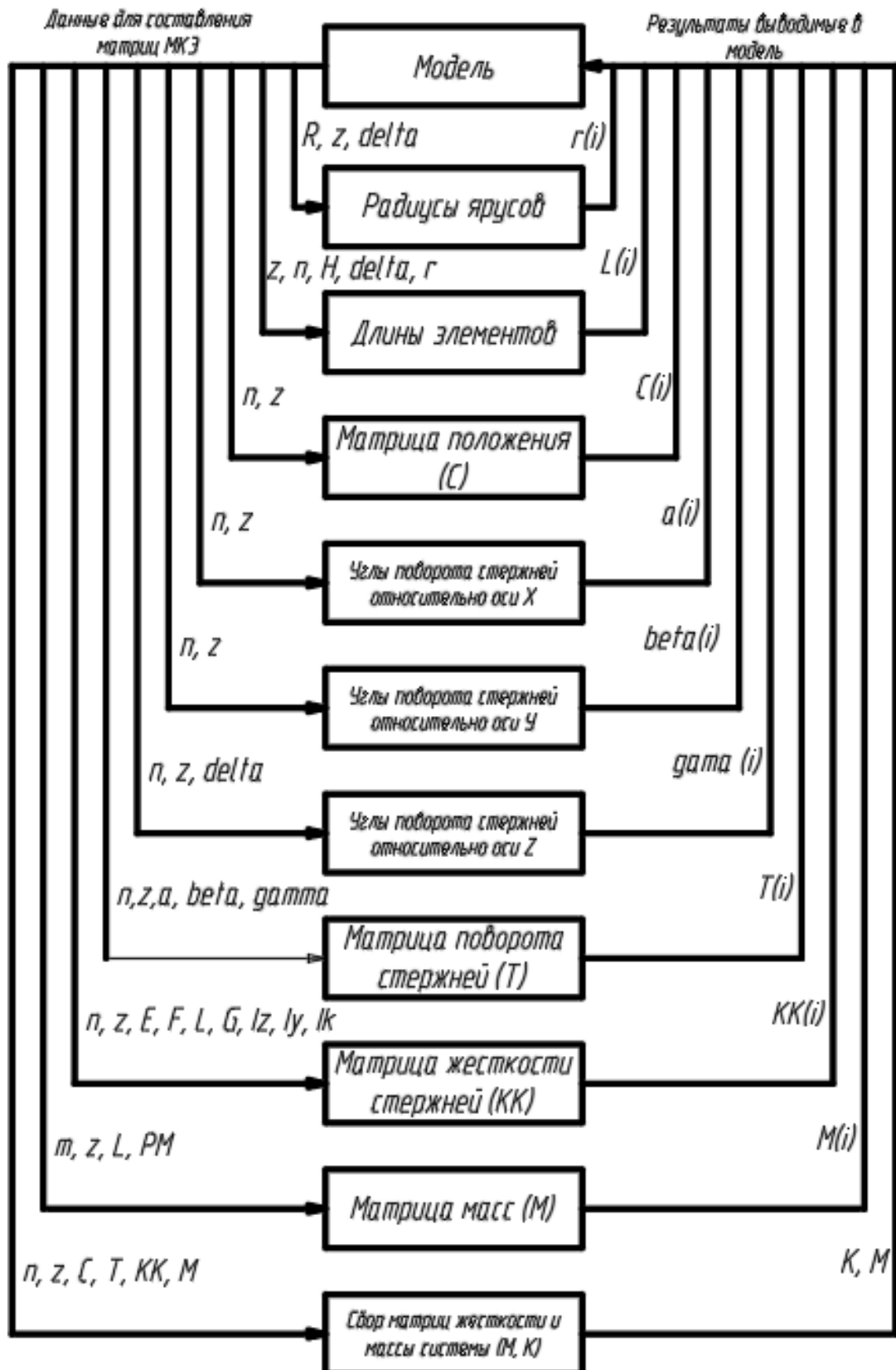


Рисунок 4 - Блок схема реализации метода конечных элементов в MATLAB

Далее прописываем в отдельной взятой процедуре-функции циклы с математическими законами для формирования матриц метода конечных элементов:

1. Определения положения для вертикальных и горизонтальных элементов – матрица  $\mathbf{C}(i)$ ;
2. Углы поворота стержней относительно оси  $X$  -  $\mathbf{a}(i)$ ;
3. Углы поворота стержней относительно оси  $Y$  –  $\mathbf{beta}(i)$ ;
4. Углы поворота стержней относительно оси  $Z$   $\mathbf{gama}(i)$ ;
5. Матрица поворота стержней - матрица  $\mathbf{T}(i)$ ;
6. Матрицы жесткости конечных элементов – матрица  $\mathbf{KK}(i)$ ;
7. Диагональная матрица масс – матрица  $\mathbf{M}(i)$ .

Где  $i$  – порядковый номер элемента в расчетной модели.

Далее собираем матрицу жесткости всей системы.

Для этого сначала создаем нулевую матрицу  $\mathbf{Kk}$  при помощи функции `Zeros` размерность  $6 \cdot n \cdot (z+1)$  столбцов на  $6 \cdot n \cdot (z+1)$  строчек.

При помощи сложения складываем к матрице  $\mathbf{Kk}$  матрицы  $\mathbf{K}(i)$ . Таким образом формируется матрица жесткости всей системы.

Аналогичным образом формируем диагональную матрицу масс системы.

В результате выполнения алгоритма сформированы матрицы для решения статических и динамических задач строительной механики.

**Вывод.** Шейн А.И., Мальков А.И. Построение динамической модели для расчета градирен гиперболического и пирамидального типов [Электронный ресурс] // Моделирование и механика конструкций. 2020. №12. Систем. требования: Adobe Acrobat Reader. URL: [http://mechanicspguas.ru/Plone/nomera-zhurnala/no12/matematiceskoe-modelirovanie-chislennye-metody-i-kompleksy-programm/12.3/at\\_download/file](http://mechanicspguas.ru/Plone/nomera-zhurnala/no12/matematiceskoe-modelirovanie-chislennye-metody-i-kompleksy-programm/12.3/at_download/file) В работе показана реализация построения программы расчета методом конечных элементов стальных башен в программном комплексе MATLAB, в соответствии с предлагаемой блок-схемой. Для построения математической модели задачи МКЭ в программе использовались циклы для формирования матриц, которые лежат в основе



метода для решения статических и динамических задач строительной механики. Такой подход позволяет вносить изменения в исходные данные и считаное время получить решения поставленной задачи.

### **Библиографический список:**

1. Пособие по проектированию градирен (к СНиП. 2.04.02-84). М. ЦИТП Госстроя СССР, 1987.
2. Шеин А.И., Мальков А.И. Построение динамической модели для расчета градирен гиперболического и пирамидального типов [Электронный ресурс] // Моделирование и механика конструкций. 2020. №12. Систем. требования: Adobe Acrobat Reader. URL: [http://mechanicspguas.ru/Plone/nomera-zhurnala/no12/matematiceskoe-modelirovanie-chislennye-metody-i-kompleksy-programm/12.3/at\\_download/file](http://mechanicspguas.ru/Plone/nomera-zhurnala/no12/matematiceskoe-modelirovanie-chislennye-metody-i-kompleksy-programm/12.3/at_download/file)
3. Шеин А.И., Чуманов А.В. Особенности колебательных движений циклически-симметричных рамных систем [Электронный ресурс] // Моделирование и механика конструкций. 2019. № 9. Систем. требования: Adobe Acrobat Reader. URL: <http://mechanicspguas.ru/Plone/nomera-zhurnala/no-9-aprel-2019/stroitel'naya-mehanika/shein-a-i-chumanov-a-v-osobennosti-kolebatelnyh-dvizhenii-ciklicheski-simmetrichnyh-ramnyh-sistem/view>
4. Shein A.I., Zemtsova O.G. Analytical solution of optimization problem of stability of frame systems // В сборнике: IOP Conference Series: Materials Science and Engineering electronic edition. 2018. С. 42-65.
5. Шеин А.И., Земцова О.Г. Жидкостной гаситель колебаний высотных сооружений при сейсмических воздействиях // Приднепровский научный вестник. 2018. Т. 5. № 3. С. 49.
6. Шеин А.И., Чуманов А.В. Численные эксперименты по гашению колебаний рамных каркасов с помощью пластических накладок, установленных на элементы каркаса [Электронный ресурс] // Моделирование и механика конструкций. 2018. №7. Систем. требования: Adobe Acrobat Reader. URL:

[http://mechanicspguas.ru/Plone/nomera-zhurnala/no7/stroitelnyamehanika/7.2/at\\_download/file](http://mechanicspguas.ru/Plone/nomera-zhurnala/no7/stroitelnyamehanika/7.2/at_download/file)

7. Шеин А.И., Чуманов А.В. Численные эксперименты по гашению колебаний вертикального стержня реактивными гасителями [Электронный ресурс] // Моделирование и механика конструкций. 2018. №8. Систем. требования: Adobe Acrobat Reader. URL: [http://mechanicspguas.ru/Plone/nomera-zhurnala/no8/matematicheskoe-modelirovanie-chislennye-metody-i-kompleksy-programm/8.2/at\\_download/file](http://mechanicspguas.ru/Plone/nomera-zhurnala/no8/matematicheskoe-modelirovanie-chislennye-metody-i-kompleksy-programm/8.2/at_download/file)

9. Шеин А.И., Чуманов А.В. Конструктивные способы гашения колебаний зданий и сооружений [Электронный ресурс] // Моделирование и механика конструкций. 2017. №6. Систем. требования: Adobe Acrobat Reader. URL: [http://mechanicspguas.ru/Plone/nomera-zhurnala/no6/stroitelnyamehanika/6.7/at\\_download/file](http://mechanicspguas.ru/Plone/nomera-zhurnala/no6/stroitelnyamehanika/6.7/at_download/file)

10. Шеин А.И., Земцова О.Г. Методика математического моделирования маятникового гасителя пространственных колебаний для сооружений башенного типа [Электронный ресурс] // Моделирование и механика конструкций. 2016. №3. Систем. требования: Adobe Acrobat Reader. URL: [http://mechanics.pguas.ru/Plone/nomera-zhurnala/no3/matematicheskoe-modelirovanie-chislennye-metody-i-kompleksy-programm/3.3/at\\_download/file](http://mechanics.pguas.ru/Plone/nomera-zhurnala/no3/matematicheskoe-modelirovanie-chislennye-metody-i-kompleksy-programm/3.3/at_download/file)

11. Шеин А.И., Чуманов А.В. Метод внешних нагрузок при расчете упругопластических балочных систем МКЭ [Электронный ресурс] // Моделирование и механика конструкций. 2016. №3. Систем. требования: Adobe Acrobat Reader. URL: [http://mechanics.pguas.ru/Plone/nomera-zhurnala/no3/stroitelnyamehanika/3.9/at\\_download/file](http://mechanics.pguas.ru/Plone/nomera-zhurnala/no3/stroitelnyamehanika/3.9/at_download/file)

12. Шеин А.И., Кузнецов А.Н., Чуманов А.В. Моделирование ветровых воздействий на высотные сооружения [Электронный ресурс] // Моделирование и механика конструкций. 2016. №4. Систем. требования: Adobe Acrobat Reader. URL: [http://mechanics.pguas.ru/Plone/nomera-zhurnala/no4/matematicheskoe-modelirovanie-chislennye-metody-i-kompleksy-programm/4.1/at\\_download/file](http://mechanics.pguas.ru/Plone/nomera-zhurnala/no4/matematicheskoe-modelirovanie-chislennye-metody-i-kompleksy-programm/4.1/at_download/file)

13. Шеин А.И. Математическое моделирование механических систем на примере задачи гашения колебаний высотных сооружений [Электронный ресурс] // Моделирование и механика конструкций. 2014. №1. Систем. требования: Adobe Acrobat Reader. URL: <http://mechanicspguas.ru/Plone/nomera-zhurnala/no1/matematicheskoe-modelirovanie-chislennye-metody-i-kompleksy-programm/matematicheskoe-modelirovanie-mehanicheskikh-sistem-na-primere-zadachi-gasheniya-kolebaniy-vysotnyh-sooruzhenii/view>

14. Шеин А.И., Бочкарев Р.В. Использование композитных систем типа "упругий - пластический" для гашения колебаний конструкций [Электронный ресурс] // Моделирование и механика конструкций. 2015. №2. Систем. требования: Adobe Acrobat Reader. URL: <http://mechanicspguas.ru/Plone/nomera-zhurnala/no2/stroitel'naya-mehanika/2.4/view>