О программе 3DFEMMesh

При проектировании и эксплуатации различных физических установок возникает необходимость в изучении распределения генерируемых в устройствах электромагнитных полей. Учитывая высокую стоимость магнитных систем, одним из наиболее используемых инструментов для этих целей является компьютерное моделирование.

Метод конечных элементов (МКЭ) [1] является наиболее удобным математическим методом для дискретизации линейных и нелинейных уравнений и для описания сложной геометрии разбиваемой области.

В целом, область применения МКЭ не ограничивается задачами физики. В машиностроении, медицине, картографии, геологии и пр. также широко используются численные методы и, в частности, МКЭ.

Использование МКЭ предполагает предварительное построение сетки, то есть некоего топологического множества точек, связанных между собой отрезками прямых линий таким образом, что исходная область разбивается на элементы определенной формы. В качестве элементов сетки обычно используются геометрические симплексы, т. е. треугольники в двумерном и тетраэдры в трехмерном случае. Это наиболее распространённые фрагменты сеток. Также возможно построение сеток и из четырёхугольников, призм, гексаэдров и др.

Генерация сеток в настоящее время выделилась в особую область знаний, несмотря на то, что это всего лишь один из этапов некоторого численного метода. Причина заключается в том, что она связана с методом лишь косвенно, через требования к полученным элементам. Кроме того, процесс построения сетки чрезвычайно трудоёмкий и требует изрядных усилий, как человеческих, так и машинных. И развитие вычислительной техники способствовало значительному прогрессу в области построения сеток.

Основные требования к генераторам сетки:

- 1. Наличие удобного интерфейса задания входных данных.
- 2. Максимально точная аппроксимация внешних границ областей, границ раздела сред с различным материалом и поверхностей задания дополнительных условий.
- 3. Отсутствие вырожденных элементов. Построенные элементы должны быть максимально приближены по форме к их правильному аналогу.
- 4. Возможность контроля среднего размера элементов в различных областях сетки.
- 5. Визуальный контроль построенной сетки. Возможность графического представления отдельных деталей, построения различных сечений.
- 6. Возможность построения сетки на компьютерах среднего класса.

В работе [2] описан алгоритм, базирующийся на представлении расчетной области в виде объединения стандартных макроблоков с дальнейшей генерацией двумерных сеток на их границах и построении трехмерных сеток отдельно в каждом макроблоке. На базе этой методики создан генератор 3DFEMMesh, описание которого приводится ниже.

Программа работает в операционной системе Windows, имеет графический интерфейс для ввода данных и визуальной оценки качества разбиения, вычисляет ряд критериев оценки качества полученной триангуляции.

Описание программы

На рис.1 приведен общий вид окна программы, где в качестве примера приведена модель шестерёнки. В верхней части экрана находится главное меню программы. Под ним поля «Mesh Name» с названием сетки, и «Grid Step», содержащее шаг триангуляции. Ниже - горизонтальный ряд кнопок, представляющий из себя панель инструментов для работы с основными элементами сетки - точками и ребрами («Points and Sides»). Если навести на кнопку курсор и задержать его там, появляется текст, поясняющий назначение этой кнопки. Нажатие на кнопку означает выбор соответствующей функции.

Слева под панелью инструментов - два поля, содержащие список точек и список рёбер. В центре окна - изображение сетки с осями координат. Крайнее справа поле (нет на рисунке) отведено для записи выполняемых операций и вычисленных значений критериев оценки качества полученной триангуляции («протокол» или log-файл). Поля имеют контекстные меню. Размеры всех полей программы можно менять.



Рис.1. Общий вид окна программы.

Главное меню программы. Раздел «Tools». Содержит список действий над сеткой в целом, начиная от загрузки сетки и кончая удалением:

- «Save Mesh» сохранить сетку.
- «Load Mesh» загрузить сетку выбрать её название из открывающегося списка.
- «Delete Mesh» удалить сохранённую сетку.
- «Export» экспорт данных запись массивов, содержащих список точек (вершин) и список рёбер в файлы с заданными именами.
- «Import Elements» импорт элементов серендипова типа.
- «Import Points» импорт точек.
- «Import Mesh Part» импорт сетки или ее части.
- «Clear All» очистить всё.



Раздел меню «Adding Sides». Используется для автоматического создания рёбер сетки: соединяет 2 точки с одинаковыми координатами по X, Y или Z в ребро.

Adding Sides Adding Symetry Recount

Connect Points By Similar Koord X Connect Points By Similar Koord Y Connect Points By Similar Koord Z

Раздел меню «Adding Symetry». Добавляет элементы сетки симметрично относительно

плоскости XY, XZ или YZ.

Adding Symetry Recou Add XY Symetry Add XZ Symetry Add YZ Symetry

Раздел меню «Recount». Построение элементов сетки:

- «Rebuild Sides» если какая-либо точка делит ребро, то оно будет разбито на 2.
- «Build Faces» поиск и построение граней макроэлементов.
- «Build Elements» поиск и построение граней макроэлементов и самих макроэлементов.
- «Build Face Division» поиск и построение граней макроэлементов и самих макроэлементов. Разбиение границы макроэлементов.
- «Build Tetrahedral Division» поиск и построение граней макроэлементов и самих макроэлементов. Разбиение границы макроэлементов. Построение 3-хмерного разбиения внутри каждого макроэлемента.



Раздел меню «View». Изменение изображения сетки:

- «View Log» показать поле, содержащее log-файл.
- «Make Square» изменение пропорций окна отображения сетки до квадрата.
- «View OXY Plus» («View OXY Minus») установка точки наблюдения со стороны оси координат Z+ (Z-). Аналогично для осей Y и X.
- «Change Z Y Coords» меняет координаты Z и Y местами у всех точек.

View	Cancel
Vie	ew Log
M	ake <mark>S</mark> qaure
Vie	ew OXY Plus
Vie	ew OXY Minus
Vie	ew OXZ Plus
Vie	ew OXZ Minus
Vie	ew OYZ Plus
Vie	ew OYZ Minus
Cł	ange Z Y Koords

Раздел меню «Cancel». Переход в режим построения сетки.

Для завершения сеанса работы с программой используется кнопка «Закрыть» в заголовке окна. Если Вы сделали изменения в модели, Вас спросят - не сохранить ли их. Если Вы хотите сохранить результаты в другом файле, надо сменить имя сетки в поле «Mesh Name».

Панель инструментов. Кнопки и их функции.

1. «Add Point» - добавление новой точки. При нажатии на эту кнопку открывается дополнительное окно, где указываются координаты точки, параметр сгущения сетки вблизи неё и принадлежность к группе (если необходимо).

Main Point	×
Point:	(0:0:0)
Concentration:	1,00000
Group:	•
🖌 🗸 Ok	X Cancel

- 2. «Delete Point» удаление ближайшей к курсору точки.
- 3. «Select points» выделение ближайшей к курсору точки. Левая кнопка мыши выделить.
- 4. «Select Points By Params» выделение точек, удовлетворяющих некоторым параметрам. Возможно выделение по названию группы и по задаваемому математическому условию.

SelectParamsFrm	SelectParamsFrm
By Group By Function	By Group By Function Input inequality [92601]
✓ Ok X Cancel	 < 0 → ✓ 0k ✓ Cancel

5. «Add Side» - добавить ребро вручную. Указываются номера начальной, средней (если необходимо) и конечной точки. В дополнительном окне можно указать его параметры.

Add Side	Side Params 🛛
First Point:	Use own parametrs
Last Point: 17	C Div on N pieces -1
Middle Point: -1	C Side Step Len -1.00000
Parametrs	Grid Step Koef 0,00000
V Ok X Cancel	V Ok X Cancel

- 6. «Add Side By 2 Points» добавить обычное ребро курсором. Указываются начальная и конечная точки.
- 7. «Add Side By 3 Points» добавить изопараметрическое ребро курсором. Указываются начальная, средняя и конечная точки.
- 8. «Delete Side» удаление ближайшего к курсору ребра.
- 9. «Select Sides» выделение ближайшего к курсору ребра. Левая кнопка мыши выделить.
- 10. «Add 1 Side» добавление двух точек и ребра по координатам.
- 11. «Add 3 Sides» добавление трёх точек и трёх ребер по координатам (треугольник).
- 12. «Add 4 Sides» добавление четырёх точек и четырёх ребер по координатам (четырёхугольник).
- 13. «Clear selections» снять выделение точек и граней.
- 14. «Show Hidden» показать скрытые точки.

Контекстное меню для точек сетки.

13:(738,39;561,61;50) [0.4] 13: [14; 17]	
14:(826,78;473,22;50) [] [14:[16;19]M=18	
15:(765,48;602,16;50) [],4] [15: [19 ; 20]	
16:(775;650;50) [0,4]	16: [17 ; 20]	
17:(900;650;50) [1	Edit point	
18:(765,48:697,84:5		
19:(738,39;738,39;5	Add Side By Selected Points	
20:(826,78;826,78;5	Add Point as Average	
21:(561,61;561,61;5	Delete selected points	
22:(602,16;534,52;5	Add Copy Points	
23:(473,22;473,22;5		
24:(820;0;50) [1]	Move Points	
25:(820;175;50) [1	Change Points Concentration	
26:(820;350;50) [1		
27:(1350;0;50) [0,8	Hide	
28:(1347,11;88,29;5	Select Sides By Points	
29:(1338,45;176,21	C 1 4 C 1 D D 1 4 4000	
30:(1424,24;-46,62;	Select Sides By Points 100%	
31:(1424,24;46,62;5	Filter Selected Points By Params	
32:(1418,14;139,67	Edit point group	
33:(1499.94:-13.09:	can point group	

- «Edit point» редактирование одной выделенной точки.
- «Add Side By Selected Points» добавление ребра на двух выделенных точках.
- «Add Point as Average» добавление точки как среднее выделенных точек.
- «Delete selected points» удаление выделенных точек.
- «Add Copy Points» добавление копии выделенных точек. При этом возможен параллельный перенос и поворот точек относительно вектора.

CloneElementsFrm	CloneElementsFrm
Do 1 Times	Do 1 Times
Move Rotate	Move Rotate
X1 = X	Rotate Vector: (0;0;1)
Y1 = y	Move Vector: (0;0;0)
Z1 = z-10	Fi: -90,00000
✓ Ok X Cancel	✓ Ok X Cancel

- «Move Points» перемещение выделенных точек. Возможен параллельный перенос и поворот точек относительно вектора.
- «Change Points Concentration» изменение сгущения сетки около выделенных точек.
- «Hide» скрыть выделенные точки.
- «Select Sides By Points» выделить рёбра, содержащие выделенные точки.
- «Select Sides By Points 100%» выделить рёбра, содержащие выделенные точки на обоих концах.
- «Filter Selected Points By Params» снять выделение части точек по параметрам.

SelectParamsFrm	SelectParamsFrm
By Group By Function	By Group By Function
Group Name	Input inequality y-601
✓ Ok X Cancel	✓ Ok X Cancel

• «Edit point group» - изменить присвоение к группе у выделенных точек.

Контекстное меню для рёбер сетки.

11: [13; 16] M 12: [16 : 17]	= 15
13: [14; 17] 14: [16; 19] M 15: [19: 20]	
16: [17 : 20 17: [10 : 21 18: [11 : 23 19: [21 : 23 20: [27 : 30	Edit Side Change Side Properties Delete selected sides
21: [30 ; 31 22: [27 ; 31	Add Copy Sides Count Points On Side

- «Edit Side» редактировать выделенное ребро.
- «Change Sides Properties» изменить параметры разбиения ребра.

Side Params	
🗆 Use own parametrs	
C Div on N pieces	-1
C Side Step Len	-1,00000
Grid Step Koef	0,00000
✓ Ok	🗙 Cancel

- «Delete selected sides» удалить выделенные рёбра.
- «Add Copy Sides» добавить копии выделенных рёбер.
- «Count Points On Side» добавить точки на ребре.

Пример построения сетки. Нарисуем магнит типа «Оконная рама»

Генерация сетки начинается с задания входной геометрии. Поскольку «Оконная рама» симметрична, достаточно нарисовать её четвертинку, состоящую из вертикальной и горизонтальной линий, которую затем можно зеркально отобразить средствами программы. В процессе создания сетки нужно выполнить ряд типичных операций. Опишем их, иллюстрируя картинками – «скриншотами» программы.

Задание точек. Первоначально задаются точки - вершины будущих макроэлементов. С помощью кнопки «Add Point» на панели инструментов создадим 4 точки с координатами (10;0;5), (20;0;5), (20;50;5), (10;50;5), кторые есть вершины прямоугольника, соответствующие одной вертикальной линии буквы «Оконной рамы». Пример задания точки (10;0;5) – ниже на рисунке.

🕸 Waiting MType = [0] SType = [0]			
Tools Adding Sides Adding Symetry Recount View Cancel			
Mesh Name: B_1 Grid Step: 1			
Points and Sides			
Main Point	Add Point		
Point: (20;40;10)	X 10,00000		
Concentration: 1,00000	Y 0,00000		
Group:	Z [5]		
✓ Ok X Cancel	✓ Ok X Cancel		

Заданные координаты точки вместе с её номером и коэффициентом сгущения (Concentration) выводятся в поле «Список точек» в формате «Номер точки: (координаты) [коэффициент сгущения]», а сами точки появляются в области изображения сетки, где ось координат X направлена вправо, ось Y - вверх, а Z - перпендикулярно плоскости листа.

Tools Adding Sides Ad Mesh Name: B_1	Symetry Recount View Can Grid Step: 1	cel
Points and Sides	-	

Задание рёбер. Следующий шаг - точки надо соединить рёбрами. Это можно сделать несколькими способами: например, воспользовавшись кнопкой панели инструментов «Add Side» и задавая номера точек ребра в дополнительном окне; кнопками «Add Side By 2 Points» или «Add Side By 3 Points», выделяя начало и конец ребра курсором. Ниже на рисунке показаны последовательные шаги построения прямоугольника в режиме построения ребра по точкам - кнопка «Add Side By 2 Points» ^L. Отмеченные курсором точки выделяются размером и цветом. Введённые рёбра повляются на рисунке и в поле «Список рёбер» в формате «Номер ребра: [номер 1-ой; 2-ой точки]».



Для ускорения и упрощения процедуры ввода данных в программе есть возможность добавления целого прямоугольника, т.е. добавления сразу 4-х точек и объединение их 4 ребрами с помощью кнопки «Add 4 Sides». Аналогично для треугольника - «Add 3 Sides». Нужно отметить, что объединять точки в рёбра курсором (мышкой) не всегда удобно, т.к. рисунок в общем случае трёхмерный.

Задание дополнительных точек. Затем надо добавить горизонтальную линию для «Оконной рамы». Для этого нам понадобятся ещё 4 точки, например, с координатами (10,40,5), (20,40,5),(0,40,5) и (0,50,5).

😵 Waiting MType = [0] SType = [0]			
<u>T</u> ools <u>A</u> dding Sides A <u>d</u> ding Symetry <u>R</u> ecount <u>V</u> iew	v <u>C</u> ancel		
Mesh Name: B_2	Grid Step: 1		
Points and Sides			
>> >			
6:(0;4 Point: (0;40;5)	Add Point		
Group:	X 0,00000		
✓ Ok ✓ Cancel	Y 50 Z 5,00000		
	V Ok X Cancel		

Вот что получилось:

😵 Waiting MType = [0] SType = [0]					- • ×
<u>I</u> ools <u>A</u> dding Sides A <u>d</u> ding Symetry <u>R</u> ecount <u>V</u> ie	v <u>C</u> ancel				
Mesh Name: B_2	Grid Step: 1				
Points and Sides		- 1			
Points and Sides				_	
				-	

«Переразбивка» рёбер. В результате этих действий появились точки, которые разбивают существующие рёбра на 2 части, поэтому надо «переразбить» рёбра. Для выполнения этой операции воспользуемся пунктом меню «Recount»/«Rebuild Sides»:

🕼 Waiting MType = [0] SType = [0]							
Tools Adding Sides Adding Symetry	<u>Recount</u> <u>View</u> <u>Cancel</u>						
Mesh Name: B 2	Rebuild Sides						
1 - 1	Build Faces						
Points and Sides	Build Elements						
	Build Face Division						
_ D 12 🗸 🖌 📥 🔀 🛰 🔀	Build Tetrahedral Division						

Картинка визуально не изменилась, но видно, что число рёбер увеличилось – их стало 6.



Соединим введённые точки рёбрами.





Копирование. С помощью пунктов меню «Adding Symmetry»/«Add YZ Symmetry» скопируем зеркально относительно оси OZY полученный фрагмент, в результате чего получим половину «Оконной рамы».



Построение объемного изображения. Следующий шаг – сделаем половинку «Оконной рамы» объёмной. Для этого добавим копию всех рёбер с их точками со смещением по оси Z. Для этого сначала выделим все рёбра (мышкой или кнопкой «Select Sides»), затем в контекстном меню выбираем пункт «Add Copy Sides», а в дополнительном окне во вкладке «Move» указываем величину смещения по оси Z: Z1=Z-10.

🕱 Waiting MType = [0] SType = [0]
Tools Adding Sides Adding Sym	etry <u>R</u> ecount <u>V</u> iew <u>Cancel</u>
Mesh Name: B_3	Grid Step: 1
Points and Sides	
0:(10:0;5) [1] 1:(20:0;5) [1] 2:(20:50;5) [1] 3:(10:50;5) [1] 4:(10:40;5) [1] 5:(20:40;5) [1] 6:(0:40;5) [1] 7:(0:50;5) [1] 8:(-10:0;5) [1] 9:(-20;0;5) [1] 10:(-20;50;5) [1] 11:(-10;50;5) [1] 12:(-10:40;5) [1] 13:(-20;40;5) [1]	0: [0: 1] 1: [2: 3] 2: [0: 4] 3: [3: 4] 4: [1: 5] 5: [2: 5] 6: [4: 6] 7: [4: 5] 8: [3: 7] 9: [6: 7] 10: [8: 9] 11: [10: 11] 12: [8: 12] 13: [11: 12] 14: [9: 13] 15: [10: 13] 16: [6: 12] 17: [12: 13] 18: [7: 11] Edit Side Count Points On Side
🕸 Waiting MType = [0] SType = [0]	and the second sec
<u>T</u> ools <u>A</u> dding Sides A <u>d</u> ding Symetry <u>R</u> ec Mesh Name: B_3	ount <u>V</u> iew <u>Cancel</u> Grid Step: 1
Points and Sides	
>> >><	CloneElementsFrm Do 1 Times Move Rotate X1 = x Y1 = y Z1 = z-10 \swarrow Ok X Cancel

🕼 Waiting MType = [0] SType = [0] Tools Adding Sides Adding Symetry Recount View 1 Mesh Name: B_3 Grid Step: Points and Sides $\begin{array}{c} 0.0050 \\ 0.0050 \\ 0.0050 \\ 0.00050 \\ 0.$ $\begin{array}{c} \underline{0:0.1} \\ 1: [2:3] \\ 2: [0:4] \\ 3: [3:4] \\ 4: [1:5] \\ 5: [2:5] \\ 6: [4:6] \\ 7: [4:5] \\ 8: [3:7] \\ 9: [6:7] \\ 1: [0:1] \\ 1: [0:1] \\ 1: [0:1] \\ 1: [1:1] \\ 1: [$ haik ARAD Editor . D:\flach\acn\Mech\T

Результат этой операции - на рисунке:

Массовая операция добавления рёбер. Для завершения построения объёмного изображения добавляем вертикальные соединительные рёбра, для чего используем функцию меню «Adding Sides»/«Connect Points By Similar Coords Z»:

😰 Waiting MType = [0] SType = [0]						
<u>T</u> ools	<u>A</u> dding Sides	A <u>d</u> ding Symetry	<u>R</u> ecount	1		
Mesh	Connect Points By Similar Koord X					
	Connect Po	oints By Similar Koo	ord Y	h		
Points	nints Connect Points By Similar Koord Z					
. 5000						



Скопируем изображение еще раз симметрично осносительно плоскости ОХZ - получаем окончательное изображение «Оконной рамы»:



Построение разбиения. После построения объемного изображения можно строить разбиение: «Recount»/«Build Tetrahedral Division»:

😰 Waiting MType = [0] SType = [0]	_
Tools Adding Sides Adding Symetry	Recount View Cancel
Mesh Name: B_3	Rebuild Sides 1 Build Faces
Points and Sides	Build Elements
	Build Face Division Build Tetrahedral Division
	4 7

3 Show Elements Division MType = [95] SType = [0]	
Tools Adding Sides Adding Symetry Recount View Cancel	
Mesh Name: B_4 Grid Step: 10	
[]	
Points and Sides	
$ \begin{array}{ c c c c c c c c c c c c c c c c c c c$	

Изменение шага сетки. Для того, чтобы сделать сетку помельче, нужено уменьшить шаг сетки - параметр в поле «Grid Step». Результат:



Изменение коэффициента сгущения. Поменяем коэффициент сгущения - сделаем при приближении к центру сетку помельче. Для этого у всех внутренних точек нужно уменьшить коэфициент сгущения. Воспользуемся функцией массового выделения «Select Points By

Params»/«By Function»: выделим все точки, которые удовлетворяют математическому выражению «|y|-41 < 0»:

By Group	By Functi	on	
Input ineq	uality		
 y -4 1			
			< 0 ·
- I 🗸 🗸	0k	🔰 🗶 Ca	incel



Теперь надо ещё отфильтровать выделенные точки. Для этого воспользуемся функцией «Filter Selected Points By Params». Среди всех выделенных точек оставим выделенными только те, которые удоблетворяют математическому выражению «|x|-11 < 0»:

🕱 Waiting MType	e = [0] SType = [0]		
Tools Adding Sid	les A <u>d</u> ding Symetry <u>R</u> ecount	<u>V</u> iew <u>C</u>	
Mesh Name: E	3_4	Gri	
Points and Side	s		
	- • Z - X × Z E		SelectParamsFrm
6:(0:40:5) [* 7:(0:50:5) [*	Edit point		By Group By Function
8:(-10;0;5) [Add Side By Selected Points		
9:(-20:0:5) [10:(-20:50:5)	Add Point as Average		Input inequality
11:(-10;50;5)	Delete selected points		M 11
12:(-10;40;5)	Add Copy Points		
13:(-20:40:5)	Move Points		
15:(20:0:-5)	Change Points Concentration		
16:(20;50;-5)	Hide		
17:(10:50:-5)	Select Sides By Points		
19:(20:40:-5)	Select Sides By Points 100%		
20:(0;40;-5)	Filter Selected Points By Params		🗸 Ok 🛛 👗 Cancel
21:(0;50;-5)	Edit point group		

Поставим выделенным точкам коэфициент сгущения 0,3. Для этого в контекстном меню «Поле точек» надо выбрать подменю «Change Points Concentration», и в открывшемся окне ввести новое значение коэффициента сгущения. После чего необходимо перестроить сетку с помощью «Recount»/«Build Tetrahedral Division».

🕼 Waiting MType = [0] SType = [0]	🕼 Waiting MType = [0] SType = [1	0]
Tools Adding Sides	Adding Symetry Recount View Cancel	Tools Adding Sides Adding Sym	netry Recount View Cancel
Mesh Name: B_4	Grid Step:	Mesh Name: B_4	Grid Step: 3
Points and Sides		Points and Sides	
□ 𝒴 ♥ ✔ ✔ ▲ 0:(10:0:5) [1] 1:(20:0:5) [1]	. ₩ → ₩ ₩ ₩ ₩ ₩ @ ≠ 0:[0;1] 1:12:31	□ >> > ✓ ✓ ▲ Z → >> 0:(10:05) [1] 1:(20:05) [1]	
2:(20:50;5) [1] 3:(10:50;5) [1] 4:(10:40:5) [1]	2:[0; 4] 2:2:0; 4] Edit point	2:(20,50,5) [1] 3:(10,50,5) [1] 4:(10,40,5) [1]	2: [0: 4] 3: [3: 4] 4: [1: 5]
5:(20:40:5) [1] 6:(0:40:5) [1] 7:(0:50:5) [1]	Add Side By Selected Points Add Point as Average	5:(20;40;5) [1] 6:(0;40;5) [1] 7:(0;50;5) [1]	5: [2:5] 6: [4:7] 7: [4:] Input new Concentration.
8:(-10;0;5) [1] 9:(-20;0;5) [1] 10:(-20;50;5) [1] 11:(-10;50;5) [1]	Delete selected points Add Copy Points Move Points	8:(-10:0:5) [1] 9:(-20:0:5) [1] 10:(-20;50:5) [1] 11:(-10:50:5) [1]	8: [3 ; 9: [6 ; New Value : 10: [8 0.3
12:(-10:40;5) [1] 13:(-20:40;5) [1] 14:(10;0;-5) [1] 15:(20;0;-5) [1]	Change Points Concentration Hide Select Sides By Points	12:(-10;40;5) [1] 13:(-20;40;5) [1] 14:(10:0:-5) [1] 15:(20:0:-5) [1]	12:[8 13:[1] 14:[9]
16:(20:50:-5) [1] 17:(10:50:-5) [1] 18:(10:40:-5) [1] 19:(20:40:-5) [1]	Select Sides By Points 100% Filter Selected Points By Params Edit point group	16(20;50;-5) [1] 17;(10;50;-5) [1] 18;(10;40;-5) [1] 19;(20;40;-5) [1]	16:[6;12] 17:[12:13] 18:[7:11] 19:[14:15]
20:(0;40;-5) [1] 21:(0;50;-5) [1] 22:(-10;0;-5) [1] 23:(-20;0;-5) [1] 24:(-20;50;-5) [1]	20:[10; 17] 21:[14;18] 22:[17;18] 23:[15;19] 24:[16;19]	20:(0:40;-5) [1] 21:(0:50:-5) [1] 22:(-10:0:-5) [1] 23:(-20:0:-5) [1] 24:(-20:50:-5) [1]	20:[16:17] 21:[4/18] 22:[17:18] 23:[15:19] 24:[16:19]
25:(-10;50;-5) [1] 26:(-10;40;-5) [1] 27:(-20;40;-5) [1]	25: [18 ; 20] 26: [18 ; 19] 27: [17 ; 21] 28: [20 : 21]	25:(-10:50:-5) [1] 26:(-10:40:-5) [1] 27:(-20:40:-5) [1]	26;[18:20] 26;[18:19] 27;[17:21]

Tools Adding Sides Addin	g Symetry Recount View Cancel	
Mesh Name: B 4	Rebuild Sides 3	
<u>j </u>	Build Faces	
Points and Sides	Build Elements	
	Build Face Division	
<u> </u>	🖚 🐹 🗡 🛛 Build Tetrahedral Division	
10:(10:0:5) [1] 1:(20:0:5) [1]	1:[2;3]	
2:(20;50;5) [0,3]	2: [0 ; 4]	
3:(10;50;5) [0,3]	3: [3 ; 4]	
4:(10:40:5) [1]	4: [1 ; 5]	
[5:(20:40:5) [1] [6:(0:40:5) [1]	5:[2;5] 6:[4:6]	
7:(0:50:5) [0 3]	7.[4.5]	
8:(-10:0:5) [1]	8: [3: 7]	
9:(-20;0;5) [1]	9: [6 ; 7]	
10:(-20;50;5) [0,3]	10:[8;9]	
11:(-10;50;5) [0,3]	11:[10;11]	
12:(-10;40;5) [1] 13:(-20:40:5) [1]	2:[8; 2] 13:[11:12]	
14:(10:0:-5) [1]	14: [9 : 13]	
15:(20;0;-5) [1]	15: [10 ; 13]	
16:(20;50;-5) [0,3]	16:[6;12]	
17:(10;50;-5) [0,3]	17: [12 ; 13]	
[18:(10:40:-5) [1] [10:(20:40:-5) [1]	18:[/;11]	
119.(20,40,-5) [1] 20:(0:40:-5) [1]	20:[16:17]	
21:(0:50:-5) [0.3]	21: [14: 18]	
22:(-10;0;-5) [1]	22: [17; 18]	
23:(-20;0;-5) [1]	23: [15 ; 19]	
24:(-20;50;-5) [0,3]	24: [16 ; 19]	
[25:(-10:50:-5) [0:3] [26:(-10:40:-5) [1]	25:[18;20] 26:[18:19]	
[20.(=10,40,-5) [1] [27:(-20:40:-5) [1]	20. [10, 13]	

Результат:

🛱 Show Elements Division MType = [95] SType = [0]	
Tools Adding Sides Adding Symetry Recount View Cancel	
Mesh Name: B_5 Grid Step: 3	
Points and Sides P is an observed in the second seco	Show Elements Division MType = [95] SType Waiting MType = [0] SType = [0] Divided on 4956 Points Consists from 15220 Tetrahedrals Q_Avg : MIN: 0.0649 MAX: 0.7071 AVG: 0.2948 GARM: 0.2013

Критерии качества разбиения. После генерации сетки производится расчёт её качества для всех сгенерённых элементов. В программе учитываются 3 критерия:

- Отношение радиуса описанной сферы к длине наибольшего ребра.
- Отношение длин наибольшего и наименьшего ребер.
- Отношение наименьшего и наибольшего телесных углов.

Затем критерии нормируются, и вычисляется среднее значение критериев для каждого элемента. В качестве итогового значения критерия для сетки используется среднее арифметическое и среднее гармоническое по всем элементам сетки. Полученные значения критериев качества разбиения выводятся в поле «Log» («View»/«View Log»). Ниже приведены результаты разбиения для нашего примера «Оконная рама», где MIN - минимальное значение критерия (самый «плохой» тетраэдр), MAX - максимальное значение (самый «хороший» тетраэдр), AVG - среднее значение, GARM - среднее гармоническое по всем тетраэдрам.

Show Elements Division MType = [95] SType = [0] Divided on 4956 Points Consists from 15220 Tetrahedrals

Q_Avg : MIN: 0,0649 MAX: 0,7071 AVG: 0,2948 GARM: 0,2013

Создание сетки

Опишем кратко весь процесс создания сетки.

Генерация сетки начинается с задания входной геометрии, которая есть объединение выпуклых макроблоков, в качестве которых могут использоваться гексаэдры, треугольные призмы, пирамиды, тетраэдры и их изопараметрические аналоги.

Первоначально задаются точки - вершины будущих макроэлементов. Точки удобно объединять в группы для массовой обработки. Точки из одной группы можно копировать с их геометрической трансформацией. Допускается сдвиг на вектор, поворот относительно прямой, отражение относительно плоскости. Можно устанавливать параметр сгущения разбиения в окрестности точки.

Для задания рёбер макроэлементов введённые вершины необходимо объединить. Это можно сделать как напрямую, введя номера вершин, так и курсором, маркируя начальную и конечную вершины ребра. Если ребро криволинейное, то дополнительно указывается его средняя точка. Для каждого ребра можно установить его локальные параметры разбиения. Рёбра, как и точки, можно копировать с их дальнейшей геометрической трансформацией. При этом вершины будут также копироваться. Ребро можно разделить на несколько более мелких частей. При этом будут добавляться новые вершины. Рёбра объединяются в треугольники и четырёхугольники.

Процесс построения трёхмерной сетки осуществляется в 3 этапа. На каждом этапе разбиения алгоритм опирается на то, что было построено на предыдущем. На первом этапе производится разбиение всех ребер стартовых макроблоков. На втором — разбиение всех граней. На третьем этапе проводится разбиение каждого макроблока отдельно с учетом уже построенного разбиения его границы.



Визуальная оценка качества разбиения.

После генерации сетка выводится на экран. Изображение можно вращать во всех направлениях, приближать и удалять, скрывать и отображать элементы. Для визуальной оценки качества разбиения существует возможность пропорционального уменьшения размеров конечных элементов.

Литература

[1] O.C. Zienkiewicz. The finite element method in engineering science. MCgraw-hill. London, 1971.

[2] Акишин П. Г., Сапожников А. А. Автоматическая генерация трёхмерных сеток. ОИЯИ, Дубна, 2015.