

# СОДЕРЖАНИЕ

<b>Введение. . . . .</b>	<b>3</b>
<b>1. Теоретическая часть . . . . .</b>	<b>4</b>
1.1. Векторные дифференциальные уравнения второго порядка с разрывными решениями . . . . .	4
1.2. Вариационная постановка . . . . .	5
1.3. Конечноэлементная дискретизация . . . . .	6
1.4. Построение матриц масс, жёсткости и вектора правой части на шестигранниках . . . . .	7
1.5. Учёт краевых условий . . . . .	8
1.6. Решатель СЛАУ PARDISO. . . . .	10
<b>2. Практическая часть. . . . .</b>	<b>12</b>
2.1. Генерация трёхмерной сетки с ячейками в виде шестигранников	12
2.2. Численное интегрирование. . . . .	16
2.3. Процесс построения локальных матриц жёсткости и масс. . . . .	18
2.4. Использование PARDISO . . . . .	20
<b>Заключение . . . . .</b>	<b>24</b>
<b>Список используемых источников. . . . .</b>	<b>25</b>
<b>Приложение 1. Текст программы . . . . .</b>	<b>26</b>

# ВВЕДЕНИЕ

Разработка программного обеспечения для моделирования трехмерного электромагнитного поля представляет собой сложную и актуальную задачу, особенно в контексте современных требований к точности и эффективности расчетов. Одним из перспективных подходов к решению таких задач является использование векторного метода конечных элементов (МКЭ), который обеспечивает высокую точность моделирования.

В данной работе рассматривается разработка программы для моделирования электромагнитного поля на шестигранных элементах, что особенно важно для задач, связанных с анализом поведения электромагнитного поля в электроразведке. Применение шестигранников в качестве базовых элементов сетки позволяет более гибко аппроксимировать сложные трехмерные структуры, что делает данный подход особенно востребованным для решения практических задач.

# 1. ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

## 1.1. ВЕКТОРНЫЕ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНЫЕ УРАВНЕНИЯ ВТОРОГО ПОРЯДКА С РАЗРЫВНЫМИ РЕШЕНИЯМИ

Математическая модель, служащая для описания электромагнитного поля в средах с изменяющимся коэффициентом магнитной проницаемости и в ситуациях, когда нельзя пренебрегать влиянием токов смещения, выглядит следующим образом:

$$\operatorname{rot} \left( \frac{1}{\mu} \operatorname{rot} \vec{A} \right) + \sigma \frac{\partial \vec{A}}{\partial t} + \epsilon \frac{\partial^2 \vec{A}}{\partial t^2} = \vec{J}^{\text{св}}. \quad (1.1)$$

Математическая модель электромагнитного поля на основе уравнения (1.1) позволяет решать самые сложные задачи электромагнетизма. Она корректно описывает электромагнитные поля в ситуациях, когда среда содержит любые неоднородности с измененными электрическими и магнитными свойствами.

При решении задач с использованием схемы разделения полей, для описания осесимметричной горизонтально-слоистой среды используется следующее уравнение:

$$-\frac{1}{\mu_0} \Delta A_\varphi + \frac{A_\varphi}{\mu_0 r^2} + \sigma \frac{\partial A_\varphi}{\partial t} = J_\varphi.$$

В свою очередь, учёт от объектов, имеющих неоднородные значения удельной электропроводности, осуществляется за счёт математической модели, описываемой уравнением (1.2)

$$\operatorname{rot} \left( \frac{1}{\mu_0} \operatorname{rot} \vec{\mathbf{A}}^+ \right) + \sigma \frac{\partial \vec{\mathbf{A}}^+}{\partial t} = (\sigma - \sigma_n) \vec{\mathbf{E}}_n. \quad (1.2)$$

Для тестирования на правильность решения дифференциального уравнения (1.2) будем использовать уравнение, правая часть которого представляется в виде вектор-функции  $\vec{\mathbf{F}}$ , а также будет иметь место быть слагаемое  $\gamma \vec{\mathbf{A}}$  в левой части уравнения:

$$\operatorname{rot} \left( \frac{1}{\mu_0} \operatorname{rot} \vec{\mathbf{A}} \right) + \gamma \vec{\mathbf{A}} + \sigma \frac{\partial \vec{\mathbf{A}}}{\partial t} = \vec{\mathbf{F}}. \quad (1.3)$$

## 1.2. ВАРИАЦИОННАЯ ПОСТАНОВКА

Будем считать, что на границе  $S = S_1 \cup S_2$  расчётной области  $\Omega$ , в которой определено уравнение (1.3), заданы краевые условия двух типов:

$$\left( \vec{\mathbf{A}} \times \vec{\mathbf{n}} \right) \Big|_{S_1} = \vec{\mathbf{A}}^g \times \vec{\mathbf{n}}, \quad (1.4)$$

$$\left( \frac{1}{\mu} \operatorname{rot} \vec{\mathbf{A}} \times \vec{\mathbf{n}} \right) \Big|_{S_1} = \vec{\mathbf{H}}^\Theta \times \vec{\mathbf{n}}. \quad (1.5)$$

Тогда эквивалентная вариационная формулировка в форме Галёркина для уравнения (1.3) без производной по времени, и с учётом краевых условий (1.4) - (1.5) имеет вид:

$$\begin{aligned} \int_{\Omega} \frac{1}{\mu_0} \operatorname{rot} \vec{\mathbf{A}} \cdot \operatorname{rot} \vec{\Psi} \, d\Omega + \int_{\Omega} \gamma \vec{\mathbf{A}} \cdot \vec{\Psi} \, d\Omega &= \int_{\Omega} \vec{\mathbf{F}} \cdot \vec{\Psi} \, d\Omega + \\ &+ \int_{S_2} \left( \vec{\mathbf{H}}^\Theta \times \vec{\mathbf{n}} \right) \cdot \vec{\Psi} \, dS \quad \forall \vec{\Psi} \in H_0^{rot}. \end{aligned} \quad (1.6)$$

### 1.3. КОНЕЧНОЭЛЕМЕНТНАЯ ДИСКРЕТИЗАЦИЯ

На шестиграннике базисные вектор-функции удобнее строить с помощью шаблонного элемента. Обычно в качестве такого берут кубик  $\Omega^E \in [-1, 1] \times [-1, 1] \times [-1, 1]$  при использовании базиса лагранжева или иерархического типа.

Пусть у нас имеется произвольный шестигранник  $\Omega_m$  с вершинами  $(\hat{x}_i, \hat{y}_i, \hat{z}_i), i = 1..8$ . Тогда отображение шаблонного кубика  $\Omega^E$  в шестигранник  $\Omega_m$  будет задаваться соотношениями:

$$x = \sum_{i=1}^8 \hat{\varphi}_i(\xi, \eta, \zeta) \hat{x}_i, \quad y = \sum_{i=1}^8 \hat{\varphi}_i(\xi, \eta, \zeta) \hat{y}_i, \quad z = \sum_{i=1}^8 \hat{\varphi}_i(\xi, \eta, \zeta) \hat{z}_i, \quad (1.7)$$

где  $\hat{\varphi}_i(\xi, \eta, \zeta)$  - стандартные скалярные трилинейные базисные функции, определённые на шаблонном элементе  $\Omega^E$ .

Отображение базисных вектор-функций  $\hat{\varphi}_i(\xi, \eta, \zeta)$  шаблонного элемента  $\Omega^E$  на шестигранник  $\Omega_m$  можно определить следующим образом:

$$\hat{\psi}_i(x, y, z) = \mathbf{J}^{-1} \hat{\varphi}_i(\xi(x, y, z), \eta(x, y, z), \zeta(x, y, z)), \quad (1.8)$$

где

$$\mathbf{J} = \begin{pmatrix} \frac{\partial x}{\partial \xi} & \frac{\partial y}{\partial \xi} & \frac{\partial z}{\partial \xi} \\ \frac{\partial x}{\partial \eta} & \frac{\partial y}{\partial \eta} & \frac{\partial z}{\partial \eta} \\ \frac{\partial x}{\partial \zeta} & \frac{\partial y}{\partial \zeta} & \frac{\partial z}{\partial \zeta} \end{pmatrix} \quad (1.9)$$

– функциональная матрица преобразования координат, переводящего кубик  $\Omega^E$  в шестигранник  $\Omega_m$ .

## 1.4. ПОСТРОЕНИЕ МАТРИЦ МАСС, ЖЁСТКОСТИ И ВЕКТОРА ПРАВОЙ ЧАСТИ НА ШЕСТИГРАННИКАХ

В силу сложной геометрии выпуклых шестигранников, расчёт локальных матриц удобнее проводить на отображении конечного элемента  $\Omega_m$  в мастер-элемент  $\Omega_E$ , представляющий из себя куб размером  $\Omega^E = [-1, 1]_x \times [-1, 1]_y \times [-1, 1]_z$ . Тогда матрица жёсткости будет рассчитываться по формуле:

$$\begin{aligned} \hat{G}_{ij} &= \int_{\Omega_e} \frac{1}{\mu_0} \text{rot} \hat{\psi}_i \cdot \text{rot} \hat{\psi}_j d\Omega = \\ &= \int_{-1}^1 \int_{-1}^1 \int_{-1}^1 \frac{1}{\mu_0} \frac{1}{|J|} (\mathbf{J}^T \text{rot} \hat{\varphi}_i) \cdot (\mathbf{J}^T \text{rot} \hat{\varphi}_j) d\xi d\eta d\zeta \end{aligned} \quad (1.10)$$

а матрица масс, в свою очередь, по формуле:

$$\hat{M}_{ij} = \int_{\Omega_e} \gamma \hat{\psi}_i \cdot \hat{\psi}_j d\Omega = \int_{-1}^1 \int_{-1}^1 \int_{-1}^1 \gamma (\mathbf{J}^{-1} \hat{\varphi}_i) \cdot (\mathbf{J}^{-1} \hat{\varphi}_j) |J| d\xi d\eta d\zeta. \quad (1.11)$$

При расчёте локального вектора правой части будем использовать формулу:

$$\hat{\mathbf{b}}^{\mathbf{J}^{\text{CT}}} = \hat{\mathbf{M}} \hat{\mathbf{f}}. \quad (1.12)$$

она универсальна и применима для любой геометрии конечного элемента и любыми базисными функциями любого порядка на нём.

Для произвольных шестигранников интегралы в соотношениях (1.10) - (1.11) берутся численно. Соответствующая схема вычисления значения инте-

грала от функции  $f(\xi, \eta, \zeta)$  по единичной области  $\Omega_E$  выглядит следующим образом:

$$\int_{-1}^1 \int_{-1}^1 \int_{-1}^1 f(\xi, \eta, \zeta) d\xi d\eta d\zeta \approx \sum_{k=1}^n \sum_{l=1}^n \sum_{r=1}^n f(t_k, t_l, t_r). \quad (1.13)$$

## 1.5. УЧЁТ КРАЕВЫХ УСЛОВИЙ

При решении уравнения (1.2) с использованием векторного МКЭ базисные вектор-функции  $\vec{\psi}_i$  строятся так, что все базисные функции конечномерного пространства  $\mathbf{V}^{\text{rot}}$  с индексами  $i \in N_0$  имеют нулевые касательные к  $S_1$  составляющие (они образуют базис подпространства  $\mathbf{V}_0^{\text{rot}}$ ). Поэтому для выполнения однородных главных краевых условий достаточно к  $n_0$  уравнениям системы (1.6) добавить  $n - n_0$  уравнений вида:

$$q_i = 0, \quad i \in N \setminus N_0.$$

Для учёта неоднородного краевого условия (1.4), как и в случае однородного, к  $n_0$  уравнениям добавляется ещё  $n - n_0$  линейных (относительно весов  $q_i$ ) уравнений, которые и должны обеспечить необходимую близость на  $S_1$  касательных составляющих приближённого решения  $\vec{\mathbf{A}}^h = \sum_{j \in N} q_j^n \vec{\psi}_j$  к касательным составляющим вектора  $\vec{\mathbf{A}}^g$ .

Однако для учёта неоднородных краевых условий в векторном МКЭ можно использовать гораздо более простую и удобную для реализации процедуру. Основная её идея заключается в том, что вектор-функция  $\vec{\mathbf{A}}^g$  из правой части краевых условий (1.4) заменяется некоторым интерполянтном  $\vec{\mathbf{A}}^{g,h}$ , представленными в виде линейной комбинации базисных вектор-функций:

$$\vec{\mathbf{A}}^{g,h} = \sum_j q_j^g \vec{\psi}_j. \quad (1.14)$$

Веса  $q_j^g$  в разложении (1.14) можно найти следующим образом. Поскольку в векторном МКЭ базисные функции  $\vec{\psi}_i$  строятся так, что на поверхности  $S_1$  ненулевые касательные имеют только  $n - n_0$  базисных вектор-функций с номерами  $i \in N \setminus N_0$ , при этом для каждой из таких вектор-функций на поверхность  $S_1$  существует точка  $(x_i, y_i, z_i)$  и проходящий через эту точку касательный к поверхности  $S_1$  вектор  $\vec{\tau}_i$  такой, что

$$\vec{\psi}_i(x_i, y_i, z_i) \cdot \vec{\tau}_i \neq 0, \quad \vec{\psi}_j(x_i, y_i, z_i) \cdot \vec{\tau}_i = 0, \quad \forall j \neq i. \quad (1.15)$$

Домножим левую и правую части уравнения (1.14) скалярно на вектор  $\vec{\tau}_i$  в точке  $(x_i, y_i, z_i)$  с учётом (1.15) получим

$$\vec{\mathbf{A}}^{g,h}(x_i, y_i, z_i) \cdot \vec{\tau}_i = q_i^g \vec{\psi}_i(x_i, y_i, z_i) \cdot \vec{\tau}_i.$$

Полагая, что в точках  $(x_i, y_i, z_i)$  значения проекции на  $\vec{\tau}_i$  интерполянта  $\vec{\mathbf{A}}^{g,h}$  должны совпадать со значениями проекций на  $\vec{\tau}_i$  вектор-функции  $\vec{\mathbf{A}}^g$ , а также потребовав равенства касательных составляющих  $\vec{\mathbf{A}}^h \times \vec{\mathbf{n}}$  искомой вектор-функции  $\vec{\mathbf{A}}^h$  к касательным составляющим  $\vec{\mathbf{A}}^{g,h} \times \vec{\mathbf{n}}$  вектор-функции

$$\vec{\mathbf{A}}^{g,h} = \sum_{i \in N \setminus N_0} q_j^g \vec{\psi}_j,$$

получим следующее выражение для учёта неоднородного главного краевого условия:

$$q_i = \frac{\vec{\mathbf{A}}^g(x_i, y_i, z_i) \cdot \vec{\tau}_i}{\vec{\psi}_i(x_i, y_i, z_i) \cdot \vec{\tau}_i}, \quad i \in N \setminus N_0.$$



## 1.6. РЕШАТЕЛЬ СЛАУ PARDISO

PARDISO (Parallel Direct Sparse Solver) — это высокопроизводительная библиотека для решения систем линейных алгебраических уравнений (СЛАУ) с разреженными матрицами. Хотя PARDISO изначально разработан как прямой решатель (direct solver), он также поддерживает итерационные методы (iterative methods) для решения задач, где прямое решение может быть неэффективным или требовать слишком много ресурсов.

К основным особенностям PARDISO можно отнести несколько пунктов. Во-первых решатель оптимизирован для работы с разреженными матрицами, которые часто возникают в задачах математического моделирования, физики, инженерии и других областях. Разреженные матрицы содержат большое количество нулевых элементов, и PARDISO эффективно использует эту структуру для уменьшения вычислительных затрат.

Во-вторых это гибкость в выборе методов. PARDISO поддерживает как прямые методы (например, LU- или Cholesky-разложение), так и итерационные методы (например, метод сопряжённых градиентов, GMRES). Это позволяет выбирать наиболее подходящий метод в зависимости от задачи.

В-третьих имеется поддержка параллельных вычислений. PARDISO разработан для эффективного использования многопроцессорных систем и графических ускорителей (GPU). Это делает его одним из самых быстрых решателей для задач с большими разреженными матрицами.

Также при использовании решателя имеется поддержка различных типов матриц. PARDISO работает с симметричными, несимметричными, положительно определёнными и неопределёнными матрицами. Это делает его универсальным инструментом для широкого круга задач.

И наконец имеется возможность интеграции с популярными платформами. PARDISO легко интегрируется с такими языками программирования, как C, C++, Fortran, а также с математическими пакетами, например, MATLAB.

Хотя PARDISO изначально ориентирован на прямые методы, он также поддерживает итерационные методы для решения СЛАУ. Это особенно полезно для задач с очень большими разреженными матрицами, где прямое решение может быть слишком затратным по памяти или времени. Например, метод сопряжённых градиентов, который эффективен для симметричных положительно определённых матриц и если матрица хорошо обусловлена, то сходится за небольшое количество итераций. Также можно использовать метод обобщённых минимальных невязок (GMRES). Он подходит для несимметричных матриц. Использует процесс Арнольди для построения ортогонального базиса. Метод бисопряжённых градиентов подходит для несимметричных матриц, более устойчив, чем классический метод BiCG. Также имеется метод минимальных невязок (MINRES) в котором используется для симметричных неопределённых матриц.

К преимуществам использования PARDISO можно отнести высокую производительность (PARDISO использует современные алгоритмы и оптимизации для достижения максимальной скорости решения), экономию памяти (благодаря работе с разреженными матрицами PARDISO минимизирует использование памяти), гибкость (поддержка как прямых, так и итерационных методов позволяет адаптировать решение под конкретную задачу) и масштабируемость (PARDISO эффективно использует многопроцессорные системы, что делает его пригодным для решения задач высокой размерности).

## 2. ПРАКТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

### 2.1. ГЕНЕРАЦИЯ ТРЁХМЕРНОЙ СЕТКИ С ЯЧЕЙКАМИ В ВИДЕ ШЕСТИГРАННИКОВ

При написании программы был использован следующий подход к построению сетки на шестигранных элементах.

1. [lines amount x] 2 [lines amount y] 2 [lines amount z] 2
2. [field description of points]
3. 0.0 0.0 0.0      1.0 0.0 0.0
4. 0.0 1.0 0.0      1.0 1.0 0.0
5. 0.0 0.0 1.0      1.0 0.0 1.0
6. 0.0 1.0 1.0      1.0 1.0 1.0
7. [unique areas amount] 1
8. [unique areas description]
9. 1 0 1 0 1 0 1
10. [unique areas coefficients description]
11. 1 1.0 1.0
12. [delimiters above X description] 1 1.0
13. [delimiters above Y description] 3 1.1
14. [delimiters above Z description] 4 0.8
15. [borders amount] 6
16. [borders description]
17. 1 1 0 1 0 0 0 1
18. 1 1 0 1 1 1 0 1
19. 1 1 0 0 0 1 0 1
20. 1 1 1 1 0 1 0 1

21. 1 1 0 1 0 1 0 0

22. 1 1 0 1 0 1 1 1

В первой строке заданы количество опорных узлов  $N_x^W$ ,  $N_y^W$ ,  $N_z^W$ , базовой плоскости по осям  $X$ ,  $Y$ ,  $Z$  соответственно. С третьей по шестую строки перечислены тройки чисел  $(x_i, y_i, z_i)$  - как раз и определяющие эти опорные узлы.

В седьмой строке указано количество уникальных областей в расчётной области, которые имеют определённые уникальные значения физических параметров  $\mu$  и  $\sigma$ . Начиная с девятой строки (в общем случае должен быть построчный перечень каждой области) описывается геометрическое расположение  $i$  - ой области. В одиннадцатой строке указаны уникальные значения параметров  $\mu$  и  $\sigma$  для  $i$  - ой области.

В строках с двенадцатой по четырнадцатую описывается количество и характер необходимых разбиений для осей  $X$ ,  $Y$ ,  $Z$  соответственно.

В пятнадцатой строке целочисленным значением задаётся количество границ. Далее с семнадцатой по двадцать вторую строки описывается расположение и характер этих границ. Первым числом задаётся тип краевого условия (т.е. принимает значения 1 или 2), вторым числом задаётся номер формулы, третьим первая координатная линия по оси  $X$ , четвёртым вторая координатная линия по оси  $X$ , пятым и шестым аналогично по оси  $Y$  и седьмым и восьмым по оси  $Z$ .

Пример расчётной области этой фигуры изображён на рисунке (2.1).

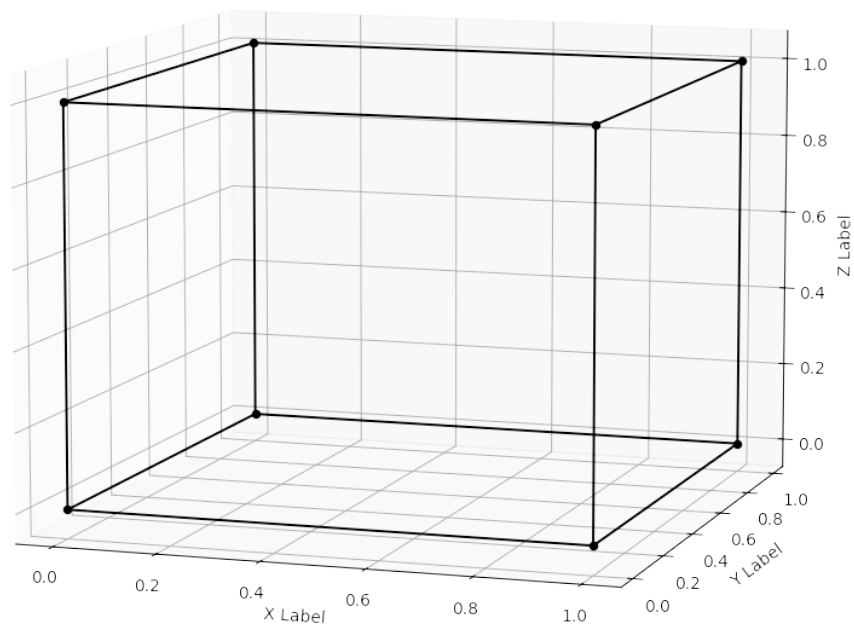


Рисунок 2.1 – Расчетная область для кубика

Попробуем подробить расчётную область (2.1) на несколько частей. Получим сетку изображённую на рисунке (2.2).

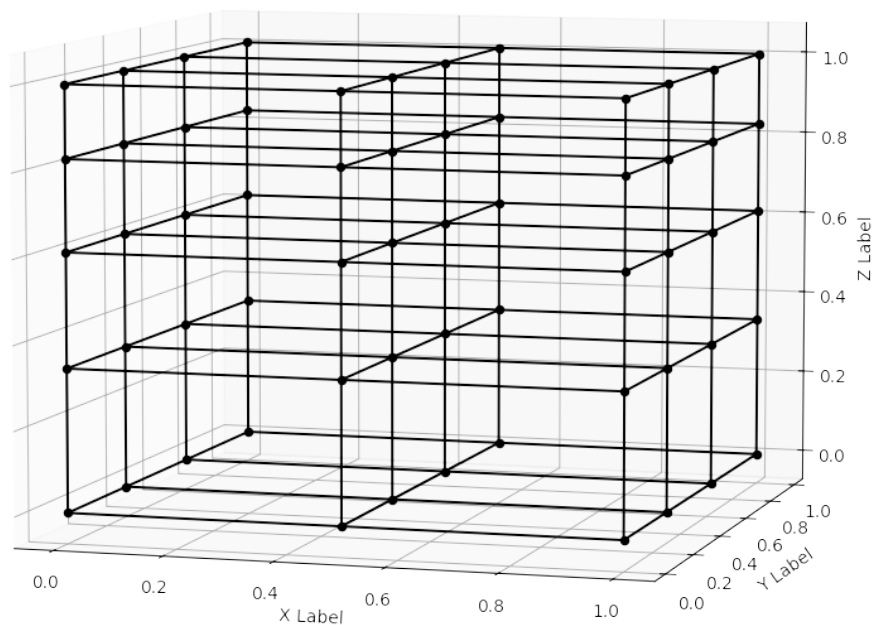
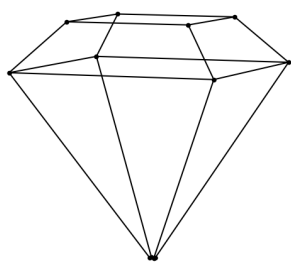
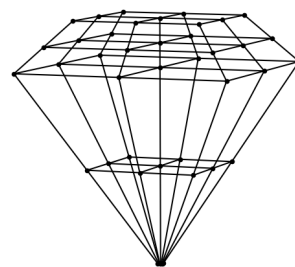


Рисунок 2.2 – Секта для кубика

Приведём ещё несколько примеров для построения сеток на шестигранниках, изображённых на рисунках 2.3 - 2.7.

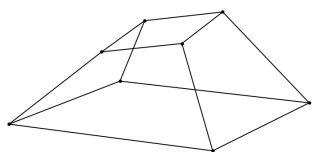


а)

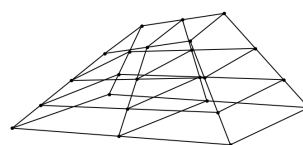


б)

Рисунок 2.3 – Расчётная область в форме изумруда (а) и сетка к ней (б).

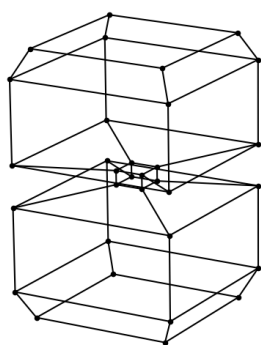


а)

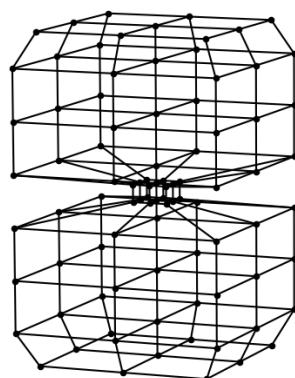


б)

Рисунок 2.4 – Расчётная область в форме скошенной пирамиды (а) и сетка к ней (б).

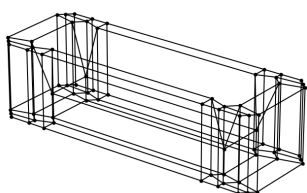


а)

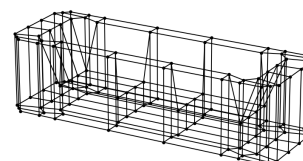


б)

Рисунок 2.5 – Расчётная область в форме песочных часов (а) и сетка к ней (б).

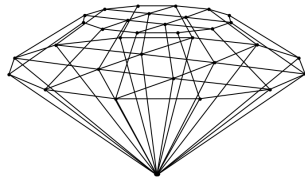


а)

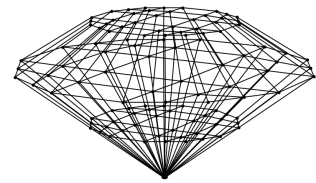


б)

Рисунок 2.6 – Расчётная область в форме ванной (а) и сетка к ней (б).



а)



б)

Рисунок 2.7 – Расчётная область в форме детализированного изумруда (а) и сетка к ней (б).

Таким образом, программа для построения сетки может строить достаточно сложные геометрически фигуры.

## 2.2. ЧИСЛЕННОЕ ИНТЕГРИРОВАНИЕ

При расчёте элементов локальных матриц жёсткости (1.10) и масс (1.11) будем использовать численное интегрирование методами Гаусса разных порядков (2, 3, 4, 5). Результаты численного интегрирования на некоторых функциях приведены в таблицах 2.1 - 2.7. Область интегрирования для всех функций единый:  $\Omega_E \in [-1; 1]_x \times [-1; 1]_y \times [-1; 1]_z$ .

Таблица 2.1 – Тестирование численного интегрирования на функции  $u = 2$ .

Аналитический результат	Гаусс 2	Гаусс 3	Гаусс 4	Гаусс 5
16.0	1.6000000e+01	1.6000000e+01	1.6000000e+01	1.6000000e+01

Таблица 2.2 – Тестирование численного интегрирования на функции

$$u = x + y + z.$$

Аналитический результат	Гаусс 2	Гаусс 3	Гаусс 4	Гаусс 5
0.0	0.0000000e+00	-2.2204460e-16	5.6898930e-16	-6.5225603e-16

Таблица 2.3 – Тестирование численного интегрирования на функции

$$u = x^2 + y^2 + z^2.$$

Аналитический результат	Гаусс 2	Гаусс 3	Гаусс 4	Гаусс 5
8.0	8.0000000e+00	8.0000000e+00	8.0000000e+00	8.0000000e+00

Таблица 2.4 – Тестирование численного интегрирования на функции

$$u = x \cdot y \cdot z.$$

Аналитический результат	Гаусс 2	Гаусс 3	Гаусс 4	Гаусс 5
0.0	8.0000000e+00	0.0000000e+00	0.0000000e+00	8.6736174e-18

Таблица 2.5 – Тестирование численного интегрирования на функции

$$u = x^2 \cdot y^2 \cdot z^2.$$

Аналитический результат	Гаусс 2	Гаусс 3	Гаусс 4	Гаусс 5
$\frac{8}{27} \approx 0.29630$	2.9629630e-01	2.9629630e-01	2.9629630e-01	2.9629630e-01

Таблица 2.6 – Тестирование численного интегрирования на функции

$$u = \cos(x + y + z).$$

Аналитический результат	Гаусс 2	Гаусс 3	Гаусс 4	Гаусс 5
4.7666...	4.7063579e+00	4.7671091e+00	4.7665835e+00	4.7665859e+00

Таблица 2.7 – Тестирование численного интегрирования на функции

$$u = e^{x+y+z}.$$

Аналитический результат	Гаусс 2	Гаусс 3	Гаусс 4	Гаусс 5
12.9845...	1.2857243e+01	1.2983458e+01	1.2984538e+01	1.2984543e+01

Таким образом, программа численного интегрирования методами Гаусса находит верное решение на соответствующем порядке.



## 2.3. ПРОЦЕСС ПОСТРОЕНИЯ ЛОКАЛЬНЫХ МАТРИЦ ЖЁСТКОСТИ И МАСС

Рассмотрим процесс построения локальных матриц жёсткости и масс. При генерации локальной матрицы масс на параллелепипеде в векторном МКЭ используется следующая локальная матрица

$$\hat{\mathbf{M}} = \gamma \frac{h_x h_y h_z}{36} \begin{pmatrix} \mathbf{D} & \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{D} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{D} \end{pmatrix}, \quad (2.1)$$

где  $\mathbf{0}$  - матрица размером  $4 \times 4$ , полностью заполненная нулями, а

$$\hat{\mathbf{D}} = \begin{pmatrix} 4 & 2 & 2 & 1 \\ 2 & 4 & 1 & 2 \\ 2 & 1 & 4 & 2 \\ 1 & 2 & 2 & 4 \end{pmatrix}.$$

Тогда на единичном элементе  $\Omega_E \in [-1; 1]_x \times [-1; 1]_y \times [-1; 1]_z$  и при  $\gamma = 1$  матрица (2.1) примет вид:

$$\hat{\mathbf{M}} = \frac{2}{9} \begin{pmatrix} \mathbf{D} & \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{D} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{D} \end{pmatrix}.$$

Попробуем сделать ту же самую процедуру при  $\gamma = 1$  и на элемента  $\Omega_E \in [-1; 1]_x \times [-1; 1]_y \times [-1; 1]_z$ , но используя интегралы из (1.11). Элементы сгенерированной матрицы в виде консольного вывода программы изображены на рисунке 2.8.

```

8.88889e-01 4.44444e-01 4.44444e-01 2.22222e-01 0.00000e+00 0.00000e+00 0.00000e+00 0.00000e+00 0.00000e+00 0.00000e+00 0.00000e+00 0.00000e+00
4.44444e-01 8.88889e-01 2.22222e-01 4.44444e-01 0.00000e+00 0.00000e+00 0.00000e+00 0.00000e+00 0.00000e+00 0.00000e+00 0.00000e+00 0.00000e+00
4.44444e-01 2.22222e-01 8.88889e-01 4.44444e-01 0.00000e+00 0.00000e+00 0.00000e+00 0.00000e+00 0.00000e+00 0.00000e+00 0.00000e+00 0.00000e+00
2.22222e-01 4.44444e-01 4.44444e-01 8.88889e-01 0.00000e+00 0.00000e+00 0.00000e+00 0.00000e+00 0.00000e+00 0.00000e+00 0.00000e+00 0.00000e+00
0.00000e+00 0.00000e+00 0.00000e+00 0.00000e+00 8.88889e-01 4.44444e-01 4.44444e-01 2.22222e-01 0.00000e+00 0.00000e+00 0.00000e+00 0.00000e+00
0.00000e+00 0.00000e+00 0.00000e+00 0.00000e+00 4.44444e-01 8.88889e-01 2.22222e-01 4.44444e-01 0.00000e+00 0.00000e+00 0.00000e+00 0.00000e+00
0.00000e+00 0.00000e+00 0.00000e+00 0.00000e+00 4.44444e-01 2.22222e-01 8.88889e-01 4.44444e-01 0.00000e+00 0.00000e+00 0.00000e+00 0.00000e+00
0.00000e+00 0.00000e+00 0.00000e+00 0.00000e+00 2.22222e-01 4.44444e-01 4.44444e-01 8.88889e-01 0.00000e+00 0.00000e+00 0.00000e+00 0.00000e+00
0.00000e+00 0.00000e+00 0.00000e+00 0.00000e+00 0.00000e+00 0.00000e+00 0.00000e+00 0.00000e+00 8.88889e-01 4.44444e-01 4.44444e-01 2.22222e-01
0.00000e+00 0.00000e+00 0.00000e+00 0.00000e+00 0.00000e+00 0.00000e+00 0.00000e+00 0.00000e+00 4.44444e-01 8.88889e-01 2.22222e-01 4.44444e-01
0.00000e+00 0.00000e+00 0.00000e+00 0.00000e+00 0.00000e+00 0.00000e+00 0.00000e+00 0.00000e+00 4.44444e-01 2.22222e-01 8.88889e-01 4.44444e-01
0.00000e+00 0.00000e+00 0.00000e+00 0.00000e+00 0.00000e+00 0.00000e+00 0.00000e+00 0.00000e+00 2.22222e-01 4.44444e-01 4.44444e-01 8.88889e-01

```

Рисунок 2.8 – Консольный вывод сгенерированной матрицы масс на  $\Omega_E$

Локальная матрица жёсткости  $\hat{\mathbf{G}}$  на параллелепипеде  $\Omega_E \in [-1, 1]_x \times [-1, 1]_y \times [-1, 1]_z$  при  $\bar{\mu} = 1$  принимает вид:

$$\hat{\mathbf{G}} = \begin{pmatrix} \frac{1}{3}\mathbf{G}_1 + \frac{1}{3}\mathbf{G}_2 & -\frac{1}{3}\mathbf{G}_2 & \frac{1}{3}\mathbf{G}_3 \\ -\frac{1}{3}\mathbf{G}_2 & \frac{1}{3}\mathbf{G}_1 + \frac{1}{3}\mathbf{G}_2 & -\frac{1}{3}\mathbf{G}_1 \\ \frac{1}{3}\mathbf{G}_3^T & -\frac{1}{3}\mathbf{G}_1 & \frac{1}{3}\mathbf{G}_1 + \frac{1}{3}\mathbf{G}_2 \end{pmatrix},$$

где

$$\mathbf{G}_1 = \begin{pmatrix} 2 & 1 & -2 & -1 \\ 1 & 2 & -1 & -2 \\ -2 & -1 & 2 & 1 \\ -1 & -2 & 1 & 2 \end{pmatrix}, \quad \mathbf{G}_2 = \begin{pmatrix} 2 & -2 & 1 & -1 \\ -2 & 2 & -1 & 2 \\ 1 & -1 & 2 & -2 \\ -1 & 1 & -2 & 2 \end{pmatrix},$$

$$\mathbf{G}_3 = \begin{pmatrix} -2 & 2 & -1 & 1 \\ -1 & 1 & -2 & 2 \\ 2 & -2 & 1 & -1 \\ 1 & -1 & 2 & -2 \end{pmatrix}.$$

Теперь, проверим генерацию матрицы жёсткости через формулу (1.10).

Консольный вывод содержимого матрицы указан на рисунке 2.9

```

1.333333e+00 -3.333333e-01 -3.333333e-01 -6.666667e-01 -6.666667e-01 6.666667e-01 -3.333333e-01 3.333333e-01 -6.666667e-01 6.666667e-01 -3.333333e-01 3.333333e-01
-3.333333e-01 1.333333e+00 -6.666667e-01 -3.333333e-01 6.666667e-01 -6.666667e-01 3.333333e-01 -3.333333e-01 -3.333333e-01 3.333333e-01 -6.666667e-01 6.666667e-01
-3.333333e-01 -6.666667e-01 1.333333e+00 -3.333333e-01 -3.333333e-01 3.333333e-01 -6.666667e-01 6.666667e-01 6.666667e-01 -6.666667e-01 3.333333e-01 -3.333333e-01
-6.666667e-01 -3.333333e-01 -3.333333e-01 1.333333e+00 3.333333e-01 -3.333333e-01 6.666667e-01 -6.666667e-01 3.333333e-01 -3.333333e-01 6.666667e-01 -6.666667e-01
-6.666667e-01 6.666667e-01 -3.333333e-01 3.333333e-01 1.333333e+00 -3.333333e-01 -3.333333e-01 -6.666667e-01 -6.666667e-01 -3.333333e-01 6.666667e-01 3.333333e-01
6.666667e-01 -6.666667e-01 3.333333e-01 -3.333333e-01 -3.333333e-01 1.333333e+00 -6.666667e-01 -3.333333e-01 -3.333333e-01 3.333333e-01 6.666667e-01 6.666667e-01
-3.333333e-01 3.333333e-01 -6.666667e-01 6.666667e-01 -3.333333e-01 -3.333333e-01 1.333333e+00 -3.333333e-01 -3.333333e-01 6.666667e-01 3.333333e-01 -3.333333e-01
3.333333e-01 -3.333333e-01 6.666667e-01 -6.666667e-01 -6.666667e-01 -3.333333e-01 -3.333333e-01 1.333333e+00 3.333333e-01 6.666667e-01 -3.333333e-01 -6.666667e-01
-6.666667e-01 -3.333333e-01 6.666667e-01 3.333333e-01 -6.666667e-01 -6.666667e-01 3.333333e-01 -3.333333e-01 -3.333333e-01 1.333333e+00 -3.333333e-01 -6.666667e-01
6.666667e-01 3.333333e-01 -6.666667e-01 -3.333333e-01 -3.333333e-01 -6.666667e-01 6.666667e-01 -3.333333e-01 -3.333333e-01 6.666667e-01 -3.333333e-01 -6.666667e-01
-3.333333e-01 -6.666667e-01 3.333333e-01 6.666667e-01 -3.333333e-01 -3.333333e-01 -6.666667e-01 3.333333e-01 -3.333333e-01 6.666667e-01 -3.333333e-01 -6.666667e-01
3.333333e-01 6.666667e-01 -3.333333e-01 -6.666667e-01 -6.666667e-01 -3.333333e-01 -3.333333e-01 6.666667e-01 -3.333333e-01 1.333333e+00 -3.333333e-01 -6.666667e-01

```

Рисунок 2.9 – Консольный вывод сгенерированной матрицы масс на  $\Omega_E$

## 2.4. ИСПОЛЬЗОВАНИЕ PARDISO

Использование PARDISO в C++ требует подключения библиотеки PARDISO и настройки параметров для решения системы линейных уравнений. PARDISO поставляется в составе Intel MKL (Math Kernel Library) или как отдельная библиотека.

PARDISO требует настройки множества параметров, таких как указатель на внутренние данные PARDISO (указатель на массив из 64 элементов, который хранит внутренние данные PARDISO, массив должен быть инициализирован нулями перед первым вызовом PARDISO и используется для хранения информации о факторизации и других внутренних данных), максимальное количество факторов (обычно 1, но если решать несколько систем с одинаковой матрицей, но разными правыми частями, это значение может быть больше 1), номер фактора, тип матрицы (1-вещественная симметричная положительно определённая, 2-вещественная симметричная неопределённая, -2 - вещественная симметричная неопределённая (альтернативный вариант), 11 - вещественная несимметричная, 6 - комплексная симметричная, 13 - комплексная несимметричная.), фаза решения (11 - анализ, 12 - анализ, факторизация и решение, 13 - анализ, факторизация и решение с итерационным уточнением, 22 - факторизация, 33 - решение, -1 - освобождение памяти), размер матрицы (число строк/столбцов), указатель на массив ненулевых элементов матрицы в разреженном формате, указатель на массив индексов начала строк в разреженном формате, указатель на массив индексов столбцов для каждого

ненулевого элемента в разреженном формате, массив перестановок (обычно NULL), количество правых частей (обычно 1), массив из 64 элементов, содержащий параметры решения (`iparm[0]` - использовать ли пользовательские настройки, `iparm[1]` - метод упорядочивания, `iparm[2]` - количество потоков, `iparm[9]` - порог для точности решения, `iparm[10]` - включить масштабирование), уровень вывода сообщений (0 - без сообщений, 1 - вывод информации о ходе решения), указатель на массив правой части системы, указатель на массив, в который будет записано решение, код ошибки (0 - успешное выполнение, отрицательные значения - фатальные ошибки, положительные значения - предупреждения).

Использование PARDISO всегда подразумевает процедуру очистки буфера памяти для решателя. Для этого необходимо вызвать функцию PARDISO ещё раз, указав значение переменной фазы решения, как -1. Если все особенности решателя были настроены правильно, то получится консольный вывод, представленный на рисунке 2.10.

На консоли будет выводиться процесс факторизации матрицы, состояние некоторых параметров при вызове функции, временные интервалы, затраченные на каждый этап при решении СЛАУ, некоторые статистические данные, например размерность матрицы, вектора, процент ненулевых значений матрицы относительно её общего размера, а также информацию о процессе факторизации.

```

=== PARDISO: solving a symmetric positive definite system ===
1-based array indexing is turned ON
PARDISO double precision computation is turned ON
Minimum degree algorithm at reorder step is turned ON
Single-level factorization algorithm is turned ON

Summary: ( starting phase is reordering, ending phase is solution )
=====

Times:
=====
Time spent in calculations of symmetric matrix portrait (fulladj): 0.000092 s
Time spent in reordering of the initial matrix (reorder)          : 0.001700 s
Time spent in symbolic factorization (symbfct)                   : 0.002374 s
Time spent in data preparations for factorization (parlist)       : 0.000113 s
Time spent in copying matrix to internal data structure (A to LU): 0.000001 s
Time spent in factorization step (numfct)                         : 0.017049 s
Time spent in direct solver at solve step (solve)                : 0.000730 s
Time spent in allocation of internal data structures (malloc)    : 0.005060 s
Time spent in additional calculations                             : 0.002921 s
Total time spent                                                  : 0.030038 s

Statistics:
=====
Parallel Direct Factorization is running on 1 OpenMP

< Linear system Ax = b >
      number of equations:          4545
      number of non-zeros in A:     51185
      number of non-zeros in A (%): 0.247785

      number of right-hand sides:    1

< Factors L and U >
< Preprocessing with multiple minimum degree, tree height >
< Reduction for efficient parallel factorization >
      number of columns for each panel: 80
      number of independent subgraphs:  0
      number of supernodes:              1642
      size of largest supernode:          100
      number of non-zeros in L:          323771
      number of non-zeros in U:           1
      number of non-zeros in L+U:        323772
      gflop  for the numerical factorization: 0.028384

      gflop/s for the numerical factorization: 1.664862

writing x.txt... done
info=0

D:\CodeRepos\PardisoTest\x64\Debug\Project1.exe (процесс 23456) завершил работу с кодом 0 (0x0).

```

Рисунок 2.10 – Консольный вывод после решения СЛАУ через PARDISO

Помимо консольного вывода вызов программы PARDISO создаст текстовый файл pardiso64.log, в котором будет написан статус вызова функции (0 если нет ни ошибок, ни предупреждений; значение больше нуля если воз-

ники предупреждения; значение меньше нуля если при вызове PARDISO произошла фатальная ошибка).

Таблица 2.8 – Тестирование при  $\overrightarrow{\mathbf{A}} = (y^2z^2; x^2z^2; x^2y^2)^T$ ,  
 $\overrightarrow{\mathbf{F}} = (y^2z^2 - 2 \cdot (y^2 + z^2); x^2z^2 - 2 \cdot (x^2 + z^2); x^2y^2 - 2 \cdot (x^2 + y^2))^T$ ,  
 $\mu = 1, \gamma = 1$

Точка   уац	Относиельная погрешность	Дельты
	цау	
	Значение21	Значение22
	Значение31	Значение32
	Значение41	Значение42

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

При выполнении учебной практики было разработано программное обеспечение, позволяющее строить сетку достаточно сложных геометрических фигур, используя трёхмерные "шестигранники" в качестве конечных элементов. Также разработано программное обеспечение, позволяющее вычислять локальные матрицы масс и жёсткости, а также значения локального вектора правой части на шестигранниках.

Однако, не был реализован учёт неоднородных главных краевых условий, из-за чего полноценную проверку решения на порядок сходимости и аппроксимации провести не удалось.

Помимо этого, был теоретически изучен и опробован на практике при решении СЛАУ метод PARDISO. Во многом PARDISO на тестовых данных выдавал почти мгновенный результат.

# СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. А.Н. Тихонов, А.А. Самарский Уравнения математической физики: Учеб.пособие. / А.Н. Тихонов, А.А. Самарский — 6-е изд., — М: Изд-во МГУ, 1999 — 799 с.
2. Ю.Г. Соловейчик, М.Э. Рояк, М.Г. Персова Метод конечных элементов для скалярных и векторных задач Учеб. пособие. — Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2007 — 896 с.
3. М.Ю.Баландин, Э.П.Шурина Векторный метод конечных элементов: Учеб. пособие. - Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2001 — 69 с.
4. М.Ю.Баландин, Э.П.Шурина Методы решения СЛАУ большой размерности: Учеб. пособие. - Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2000 — 70 с.
5. М.Г. Персова, Ю.Г. Соловейчик, Д.В. Вагин, П.А. Домников, Ю.И. Кошкина Численные методы в уравнениях математической физики. - Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2016 — 60 с.



# ПРИЛОЖЕНИЕ 1. ТЕКСТ ПРОГРАММЫ

## FEM.h

```
1  #pragma once
2
3  #include <vector>
4  #include <array>
5  #include <fstream>
6
7  #include "../Mathematical_objects/MathematicalHeader.h"
8  #include "../Logger/Logger.h"
9  #include "../Mesh/Mesh.h"
10 #include "../Solvers/MainSolverHeader.h"
11
12 typedef std::array<double, 3> vector;
13
14 enum class EquationType {
15     Hyperbolical, Parabolical,
16     Elliptical, NotStated };
17
18 enum class InputExtension { Txt, Bin };
19
20 class FEM {
21     bool _isDataCommitted = false;
22     bool isDataCommitted() const { return _isDataCommitted; }
23     bool _isSolved = false;
24     bool isSolved() const { return _isSolved; }
25     // Based.
26     std::vector<std::array<size_t, 13>> _areas{};
27     std::vector<std::array<size_t, 3>> _borderRibs{};
28     std::vector<std::array<size_t, 6>> _newBorderRibs{};
29     std::vector<std::array<double, 3>> _points{};
30     std::vector<std::pair<size_t, size_t>> _generatedRibs{};
31     std::vector<std::pair<size_t, std::pair<double, double>>> _areasInfo{};
32     std::vector<double> _time{};
33     void SolveElliptical();
34     void SolveParabolical();
35     void SolveHyperbolical();
36     GlobalMatrix* A;
37     GlobalVector* b;
38     GlobalVector x;
39     Solver* _s;
40 public:
41     void ReadMeshData(InputExtension ie);
42     void GetMeshData(const Mesh* mesh);
43     void BuildMatrixAndVector();
44     vector GetSolutionAtPoint(double x, double y, double z);
45     void SetSolver(Solver* s);
46     void Solve();
47     void WriteAnswer();
48     EquationType Type = EquationType::NotStated;
49     __declspec(property(get = isDataCommitted)) bool IsDataCommitted;
50     __declspec(property(get = isSolved)) bool IsSolved;
51     FEM();
52     FEM(std::vector<std::array<size_t, 13>> areas,
53         std::vector<std::array<size_t, 3>> borderRibs,
54         std::vector<std::array<double, 3>> points,
55         std::vector<std::pair<size_t, size_t>> generatedRibs) :
56         _areas(areas), _borderRibs(borderRibs),
57         _points(points), _generatedRibs(generatedRibs) {}
58     ~FEM();
59 };
```

## FEM.cpp

```

1  #include "FEM.h"
2
3  void FEM::SolveElliptical() {
4      A = new GlobalMatrix(); b = new GlobalVector(_generatedRibs.size());
5      x = GlobalVector(_generatedRibs.size());
6      A->GeneratePortrait(_areas, _generatedRibs.size());
7      A->Fill(_areas, _points, _generatedRibs, _areasInfo);
8      b->Fill(_areas, _points, _generatedRibs);
9      A->CommitBoundaryConditions(_newBorderRibs);
10     b->CommitBoundaryConditions(_newBorderRibs, _points, _generatedRibs); }
11
12 void FEM::SolveParabolical() {
13     Logger::ConsoleOutput("Couldn't read Parabolic problem", NotificationColor::Alert);
14     exit(-1); }
15
16 void FEM::SolveHyperbolical() {
17     Logger::ConsoleOutput("Couldn't read Hyperbolic problem", NotificationColor::Alert);
18     exit(-1); }
19
20 void FEM::ReadMeshData(InputExtension ie) {
21     Logger::ConsoleOutput("Couldn't read from file", NotificationColor::Alert);
22     exit(-1); }
23
24 void FEM::GetMeshData(const Mesh* mesh) {
25     for (const auto& point : mesh->Points) {
26         std::array<double, 3> _point = { point.x, point.y, point.z };
27         _points.push_back(_point); }
28     for (const auto& area : mesh->getAreasAsRibs()) {
29         std::array<size_t, 13> _area = { area.subdomainNum_,
30             area.refs_[0], area.refs_[1], area.refs_[2], area.refs_[3],
31             area.refs_[4], area.refs_[5], area.refs_[6], area.refs_[7],
32             area.refs_[8], area.refs_[9], area.refs_[10], area.refs_[11] };
33         _areas.push_back(_area); }
34     for (const auto& rib : mesh->getRibsRefs()) {
35         std::pair<size_t, size_t> _rib{ rib.p1, rib.p2 };
36         _generatedRibs.push_back(_rib); }
37     for (const auto& border : mesh->getNewBorderRibs()) {
38         std::array<size_t, 6> rwe{border[0], border[1], border[2], border[3], border[4],
39             ↪ border[5]};
40         _newBorderRibs.push_back(rwe); }
41     for (const auto& areasInfos : mesh->AreasInfo) {
42         std::pair<size_t, std::pair<double, double>> _area{ areasInfos.subdomainNum_,
43             ↪ {areasInfos.mu_, areasInfos.sigma_} };
44         _areasInfo.push_back(_area); }
45     _isDataCommited = true; }
46
47 void FEM::BuildMatrixAndVector() {
48     switch (Type) {
49     case EquationType::Hyperbolical: SolveHyperbolical(); break;
50     case EquationType::Parabolical: SolveParabolical(); break;
51     case EquationType::Elliptical: SolveElliptical(); break;
52     case EquationType::NotStated: default:
53         Logger::ConsoleOutput("Equation type didn't stated. Exit program.",
54             ↪ NotificationColor::Alert);
55         exit(-1); break; } }
56
57 vector FEM::GetSolutionAtPoint(double x, double y, double z) {
58     Logger::ConsoleOutput("Can't get solution at point.", NotificationColor::Alert);
59     exit(-1);
60     return vector(); }
61
62 void FEM::SetSolver(Solver* s) { _s = s; }
63
64 void FEM::Solve() { x = _s->Solve(*A, *b); }
65
66 void FEM::WriteAnswer() {
67     std::ofstream fout("Data/Output/solution.txt");
68     for (size_t i(0); i < x.getSize(); ++i)
69         fout << i << ". " << std::setprecision(15) << std::scientific << x(i) <<
70             ↪ std::endl;
71     fout.close(); }

```

```

69 FEM::FEM() { Logger::ConsoleOutput("FEM declared, but it's empty",
   ↳ NotificationColor::Warning); }
70
71 FEM::~FEM() {}

```

## Integration.h

```

1  #pragma once
2
3  #include <array>
4  #include <functional>
5
6  typedef std::function<double(double, double, double)> function;
7
8  class Integration {
9  private:
10     static const std::array<double, 2> t2; static const std::array<double, 2> tau2;
11     static const std::array<double, 3> t3; static const std::array<double, 3> tau3;
12     static const std::array<double, 4> t4; static const std::array<double, 4> tau4;
13     static const std::array<double, 5> t5; static const std::array<double, 5> tau5;
14 public:
15     Integration() = delete;
16     static double Gauss2(function f); static double Gauss3(function f);
17     static double Gauss4(function f); static double Gauss5(function f);
18 };
19

```

## Integration.cpp

```

1  #include "Integration.h"
2
3  const std::array<double, 2> Integration::t2 = { 0.577'350'2692, -0.577'350'2692 };
4  const std::array<double, 2> Integration::tau2 = { 1.0, 1.0 };
5  const std::array<double, 3> Integration::t3{ 0.0, 0.774'596'669'24, -0.774'596'669'24 };
6  const std::array<double, 3> Integration::tau3{ 8.0 / 9.0, 5.0 / 9.0, 5.0 / 9.0 };
7  const std::array<double, 4> Integration::t4{ -0.861'136'311'6, -0.339'981'043'6,
8         0.339'981'043'6, 0.861'136'311'6 };
9  const std::array<double, 4> Integration::tau4{ 0.347'854'845'1, 0.652'145'154'9,
10         0.652'145'154'9, 0.347'854'845'1 };
11 const std::array<double, 5> Integration::t5{ -0.906'179'845'9, -0.538'469'310'1,
12        0.0,
13        0.538'469'310'1, 0.906'179'845'9 };
14 const std::array<double, 5> Integration::tau5{ 0.236'926'885'1, 0.478'628'670'5,
15        0.568'888'888'9, 0.478'628'670'5,
16        0.236'926'885'1 };
17
18 double Integration::Gauss2(function f) {
19     double ans(0.0);
20     for (size_t k(0); k < 2; ++k)
21         for (size_t j(0); j < 2; ++j)
22             for (size_t i(0); i < 2; ++i)
23                 ans += tau2[k] * tau2[j] * tau2[i] * f(t2[k], t2[j], t2[i]);
24     return ans; }
25
26 double Integration::Gauss3(function f) {
27     double ans(0.0);
28     for (size_t k(0); k < 3; ++k)
29         for (size_t j(0); j < 3; ++j)
30             for (size_t i(0); i < 3; ++i)
31                 ans += tau3[k] * tau3[j] * tau3[i] * f(t3[k], t3[j], t3[i]);
32     return ans; }
33
34 double Integration::Gauss4(function f) {
35     double ans(0.0);
36     for (size_t k(0); k < 4; ++k)
37         for (size_t j(0); j < 4; ++j)
38             for (size_t i(0); i < 4; ++i)
39                 ans += tau4[k] * tau4[j] * tau4[i] * f(t4[k], t4[j], t4[i]);
40     return ans; }
41

```

```

42 double Integration::Gauss5(function f) {
43     double ans(0.0);
44     for (size_t k(0); k < 5; ++k)
45         for (size_t j(0); j < 5; ++j)
46             for (size_t i(0); i < 5; ++i)
47                 ans += tau5[k] * tau5[j] * tau5[i] * f(t5[k], t5[j], t5[i]);
48     return ans; }

```

## GlobalMatrix.h

```

1  #pragma once
2
3  #include "../Logger/Logger.h"
4  #include "Matrix.h"
5  #include "LocalMatrix.h"
6  #include "GlobalVector.h"
7
8  #include <vector>
9  #include <array>
10 #include <algorithm>
11
12 class GlobalMatrix : public Matrix {
13 private:
14     size_t _size = 0;
15     bool _isPortraitGenerated = false;
16     inline bool isPortraitGenerated() const { return _isPortraitGenerated; }
17     void addLocalMatrixValues(const std::array<size_t, 12> localRibs, const LocalMatrix&
18         ↪ G, const LocalMatrix& M);
19     double getAlValue(size_t i, size_t j) const;
20     double getAuValue(size_t i, size_t j) const;
21 public:
22     inline size_t getSize() const override { return _di.size(); }
23     void GeneratePortrait(std::vector<std::array<size_t, 13>> areas, size_t ribsAmount);
24     void Fill(std::vector<std::array<size_t, 13>> areas, std::vector<std::array<double,
25         ↪ 3>> points,
26         std::vector<std::pair<size_t, size_t>> generatedRibs,
27         ↪ std::vector<std::pair<size_t, std::pair<double, double>>> areasInfo);
28     void CommitBoundaryConditions(std::vector<std::array<size_t, 6>> borderRibs);
29     std::vector<double> _al{};
30     std::vector<double> _au{};
31     std::vector<double> _di{};
32     std::vector<size_t> _ig{};
33     std::vector<size_t> _jg{};
34     inline double AL(size_t i) const { return i < _al.size() ? _al[i] : throw "_al
35         ↪ argument out of range."; }
36     inline double AU(size_t i) const { return i < _au.size() ? _au[i] : throw "_au
37         ↪ argument out of range."; }
38     inline double DI(size_t i) const { return i < _di.size() ? _di[i] : throw "_di
39         ↪ argument out of range."; }
40     inline size_t IG(size_t i) const { return i < _ig.size() ? _ig[i] : throw "_ig
41         ↪ argument out of range."; }
42     inline size_t JG(size_t i) const { return i < _jg.size() ? _jg[i] : throw "_jg
43         ↪ argument out of range."; }
44     __declspec(property(get = isPortraitGenerated)) bool IsPortraitGenerated;
45     __declspec(property(get = getSize)) size_t Size;
46     double getValue(size_t i, size_t j);
47     double operator() (size_t i, size_t j) const override; // getter.
48     double& operator() (size_t i, size_t j) override; // setter.
49     GlobalMatrix() {};
50     ~GlobalMatrix() {};
51     friend GlobalVector operator*(const GlobalMatrix A, const GlobalVector b);
52 };

```

## GlobalMatrix.cpp

```

1  #include "GlobalMatrix.h"
2
3  void GlobalMatrix::addLocalMatrixValues(const std::array<size_t, 12> localRibs, const
4  ↪ LocalMatrix& G, const LocalMatrix& M) {

```

```

4     const std::array<size_t, 12> switchV{
5         0, 3, 8, 11,
6         1, 2, 9, 10,
7         4, 5, 6, 7 };
8     int ii(0);
9     for (const auto& i : localRibs) {
10         int jj(0);
11         for (const auto& j : localRibs) {
12             int ind(0);
13             if (i - j == 0)
14                 _di[i] += G(switchV[ii], switchV[jj]) + M(switchV[ii], switchV[jj]);
15             else if (i - j < 0) {
16                 ind = _ig[j];
17                 for (; ind <= _ig[j + 1] - 1; ind++) if (_jg[ind] == i) break;
18                 _au[ind] += G(switchV[ii], switchV[jj]) + M(switchV[ii], switchV[jj]);
19             }
20             else if (i - j > 0) {
21                 ind = _ig[i];
22                 for (; ind <= _ig[i + 1] - 1; ind++) if (_jg[ind] == j) break;
23                 _al[ind] += G(switchV[ii], switchV[jj]) + M(switchV[ii], switchV[jj]);
24             } ++jj; } ++ii; }
25 }
26
27 double GlobalMatrix::getAlValue(size_t i, size_t j) const {
28     for (size_t ii = 0; ii < _ig[i + 1] - _ig[i]; ii++)
29         if (_jg[_ig[i] + ii] == j) return _al[_ig[i] + ii];
30     return 0.0;
31 }
32
33 double GlobalMatrix::getAuValue(size_t i, size_t j) const {
34     for (int ii = 0; ii < _ig[i + 1] - _ig[i]; ii++)
35         if (_jg[_ig[i] + ii] == j) return _au[_ig[i] + ii];
36     return 0.0;
37 }
38
39 void GlobalMatrix::GeneratePortrait(std::vector<std::array<size_t, 13>> areas, size_t
↪ ribsAmount) {
40     _ig.resize(ribsAmount + 1);
41     std::vector<std::vector<size_t>> additionalVector(ribsAmount);
42     for (const auto& area : areas)
43         for (size_t i(1); i < 13; ++i)
44             for (size_t j(1); j < 13; ++j)
45                 if (area[j] < area[i] and std::find(additionalVector[area[i]].begin(),
↪ additionalVector[area[i]].end(), area[j]) ==
↪ additionalVector[area[i]].end()) {
46                     additionalVector[area[i]].push_back(area[j]);
47                     std::sort(additionalVector[area[i]].begin(),
↪ additionalVector[area[i]].end()); }
48     _ig[0] = 0;
49     for (size_t i(0); i < ribsAmount; i++) {
50         _ig[i + 1] = _ig[i] + additionalVector[i].size();
51         _jg.insert(_jg.end(), additionalVector[i].begin(), additionalVector[i].end()); }
52     _di.resize(ribsAmount); _al.resize(_jg.size()); _au.resize(_jg.size());
53 }
54
55 void GlobalMatrix::Fill(std::vector<std::array<size_t, 13>> areas,
↪ std::vector<std::array<double, 3>> points,
56 std::vector<std::pair<size_t, size_t>> generatedRibs, std::vector<std::pair<size_t,
↪ std::pair<double, double>>> areasInfo) {
57     for (const auto& area : areas) {
58         auto mu = [area, areasInfo]() {
59             for (const auto& info : areasInfo)
60                 if (area[0] == info.first) return info.second.first; };
61         auto sigma = [area, areasInfo]() {
62             for (const auto& info : areasInfo)
63                 if (area[0] == info.first) return info.second.second; };
64         std::array<size_t, 12> localArea{ area[1], area[4], area[9], area[12],
65             area[2], area[3], area[10], area[11],
66             area[5], area[6], area[7], area[8] };
67         std::array<double, 8> xPoints = { points[generatedRibs[localArea[0]].first][0],
↪ points[generatedRibs[localArea[0]].second][0],
68             points[generatedRibs[localArea[1]].first][0],
↪ points[generatedRibs[localArea[1]].second][0],
69             points[generatedRibs[localArea[2]].first][0],
↪ points[generatedRibs[localArea[2]].second][0],

```

```

70         points[generatedRibs[localArea[3]].first][0],
71         ↪ points[generatedRibs[localArea[3]].second][0] };
72     std::array<double, 8> yPoints = { points[generatedRibs[localArea[0]].first][1],
73     ↪ points[generatedRibs[localArea[0]].second][1],
74     points[generatedRibs[localArea[1]].first][1],
75     ↪ points[generatedRibs[localArea[1]].second][1],
76     points[generatedRibs[localArea[2]].first][1],
77     ↪ points[generatedRibs[localArea[2]].second][1],
78     points[generatedRibs[localArea[3]].first][1],
79     ↪ points[generatedRibs[localArea[3]].second][1] };
80     std::array<double, 8> zPoints = { points[generatedRibs[localArea[0]].first][2],
81     ↪ points[generatedRibs[localArea[0]].second][2],
82     points[generatedRibs[localArea[1]].first][2],
83     ↪ points[generatedRibs[localArea[1]].second][2],
84     points[generatedRibs[localArea[2]].first][2],
85     ↪ points[generatedRibs[localArea[2]].second][2],
86     points[generatedRibs[localArea[3]].first][2],
87     ↪ points[generatedRibs[localArea[3]].second][2] };
88     LocalMatrix localG(mu(), xPoints, yPoints, zPoints, LMType::Stiffness);
89     LocalMatrix localM(sigma(), xPoints, yPoints, zPoints, LMType::Mass);
90     addLocalMatrixValues(localArea, localG, localM); }
91 }
92
93 void GlobalMatrix::CommitBoundaryConditions(std::vector<std::array<size_t, 6>>
94     ↪ borderRibs) {
95     for (const auto& rib : borderRibs) {
96         switch (rib[0]) {
97             case 2: case 3:
98                 Logger::ConsoleOutput("Can't commit boundary conditions of 2nd or 3rd type.",
99                 ↪ NotificationColor::Alert);
100                 exit(-1); break;
101             case 1:
102                 for (size_t i(2); i < 6; ++i) {
103                     for (size_t j(_ig[rib[i]]); j < _ig[rib[i] + 1]; ++j) _al[j] = 0;
104                     _di[rib[i]] = 1.0;
105                     for (size_t j = 0; j < _jg.size(); ++j) if (_jg[j] == rib[i]) _au[j] = 0;
106                     } break;
107             default: break; } }
108 }
109
110 double GlobalMatrix::getValue(size_t i, size_t j) {
111     if (i == j) return _di[i];
112     else if (i - j < 0) getAuValue(i, j);
113     else if (i - j > 0) getAlValue(j, i);
114 }
115
116 double GlobalMatrix::operator()(size_t i, size_t j) const {
117     if (i == j) return _di[i];
118     else if (i - j < 0) getAuValue(i, j);
119     else if (i - j > 0) getAlValue(i, j);
120 }
121
122 double& GlobalMatrix::operator()(size_t i, size_t j) {
123     Logger::ConsoleOutput("Can't set value for global matrix.", NotificationColor::Alert);
124     exit(-1); }
125
126 GlobalVector operator*(const GlobalMatrix A, const GlobalVector b) {
127     if (A.Size != b.Size) Logger::ConsoleOutput("Matrix and vector have different sizes
128     ↪ during multiplication", NotificationColor::Alert);
129     GlobalVector ans(b.Size);
130     for (size_t i(0); i < b.Size; ++i) {
131         for (size_t j(0); j < A._ig[i + 1] - A._ig[i]; ++j) {
132             ans(i) += A._al[A._ig[i] + j] * b(A._jg[A._ig[i] + j]);
133             ans(A._jg[A._ig[i] + j]) += A._au[A._ig[i] + j] * b(i); }
134         ans(i) += A._di[i] * b(i); }
135     return ans;
136 }

```

## LocalMatrix.h

```
1  #pragma once
2
3  #include "Matrix.h"
4  #include "JacobiMatrix.h"
5  #include "../Integration/Integration.h"
6  #include "../Functions/BasisFunction.h"
7
8  typedef JacobiMatrix J;
9
10 enum class LMType {
11     Stiffness,
12     Mass,
13     NotStated
14 };
15
16 class LocalMatrix : public Matrix {
17 private:
18     double _koef;
19     const size_t _localMatrixSize = 12;
20     LMType _matrixType = LMType::NotStated;
21     std::array<double, 8> _x{};
22     std::array<double, 8> _y{};
23     std::array<double, 8> _z{};
24     std::array<std::array<double, 12>, 12> _values{};
25     void generate();
26     void generateG();
27     void generateM();
28 public:
29     LocalMatrix() { _koef = 0.0; }
30     LocalMatrix(double koef, std::array<double, 8> x, std::array<double, 8> y,
31         ↪ std::array<double, 8> z, LMType matrixType) :
32         _koef(koef), _matrixType(matrixType), _x(x), _y(y), _z(z) {
33         generate();
34     }
35     ~LocalMatrix() {}
36     double operator() (size_t i, size_t j) const override { return _values[i][j]; };
37     double& operator() (size_t i, size_t j) override { return _values[i][j]; };
38     inline LMType GetMatrixType() const { return _matrixType; }
39     size_t getSize() const override { return _localMatrixSize; };
40 };
41
42 std::function<double(double, double, double)> operator* (std::function<double(double,
43     ↪ double, double)> f1,
44     std::function<double(double, double, double)> f2);
45
46 std::function<double(double, double, double)> operator+ (std::function<double(double,
47     ↪ double, double)> f1,
48     std::function<double(double, double, double)> f2);
49
50 std::function<double(double, double, double)> operator/ (std::function<double(double,
51     ↪ double, double)> f1,
52     std::function<double(double, double, double)> f2);
```

## LocalMatrix.cpp

```
1  #include "LocalMatrix.h"
2
3  std::function<double(double, double, double)> operator* (std::function<double(double,
4     ↪ double, double)> f1,
5     std::function<double(double, double, double)> f2) {
6     return [f1, f2](double t0, double t1, double t2) { return f1(t0, t1, t2) * f2(t0, t1,
7     ↪ t2); }; }
8
9  std::function<double(double, double, double)> operator+(std::function<double(double,
10     ↪ double, double)> f1,
11     std::function<double(double, double, double)> f2) {
12     return [f1, f2](double t0, double t1, double t2) { return f1(t0, t1, t2) + f2(t0, t1,
13     ↪ t2); }; }
```

```

11 std::function<double(double, double, double)> operator/(std::function<double(double,
    ↪ double, double)> f1,
12               std::function<double(double, double, double)> f2) {
13     return [f1, f2](double t0, double t1, double t2) { return f1(t0, t1, t2) / f2(t0, t1,
    ↪ t2); }; }
14
15 void LocalMatrix::generate() {
16     switch (_matrixType) {
17     case LMType::Stiffness: generateG(); break;
18     case LMType::Mass: generateM(); break;
19     case LMType::NotStated: default: break; }
20 }
21
22 void LocalMatrix::generateG() {
23     J::SetValues(_x, _y, _z);
24     for (size_t i(0); i < _localMatrixSize; ++i) {
25         for (size_t j(0); j < _localMatrixSize; ++j) {
26             auto rotPhi_i = BasisFunction::getRotAt(i);
27             auto rotPhi_j = BasisFunction::getRotAt(j);
28             std::array<std::function<double(double, double, double)>, 3> v1{
29                 J::GetValueAtTransposed(0, 0) * rotPhi_i[0] + J::GetValueAtTransposed(0, 1) *
    ↪ rotPhi_i[1] + J::GetValueAtTransposed(0, 2) * rotPhi_i[2],
30                 J::GetValueAtTransposed(1, 0) * rotPhi_i[0] + J::GetValueAtTransposed(1, 1) *
    ↪ rotPhi_i[1] + J::GetValueAtTransposed(1, 2) * rotPhi_i[2],
31                 J::GetValueAtTransposed(2, 0) * rotPhi_i[0] + J::GetValueAtTransposed(2, 1) *
    ↪ rotPhi_i[1] + J::GetValueAtTransposed(2, 2) * rotPhi_i[2], };
32             std::array<std::function<double(double, double, double)>, 3> v2{
33                 J::GetValueAtTransposed(0, 0) * rotPhi_j[0] + J::GetValueAtTransposed(0, 1) *
    ↪ rotPhi_j[1] + J::GetValueAtTransposed(0, 2) * rotPhi_j[2],
34                 J::GetValueAtTransposed(1, 0) * rotPhi_j[0] + J::GetValueAtTransposed(1, 1) *
    ↪ rotPhi_j[1] + J::GetValueAtTransposed(1, 2) * rotPhi_j[2],
35                 J::GetValueAtTransposed(2, 0) * rotPhi_j[0] + J::GetValueAtTransposed(2, 1) *
    ↪ rotPhi_j[1] + J::GetValueAtTransposed(2, 2) * rotPhi_j[2], };
36             for (size_t k(0); k < 3; ++k) _values[i][j] += Integration::Gauss5((v1[k] * v2[k])
    ↪ / J::GetDeterminant());
37             _values[i][j] /= _koef; } }
38 }
39
40 void LocalMatrix::generateM() {
41     J::SetValues(_x, _y, _z);
42     for (size_t i(0); i < _localMatrixSize; ++i) {
43         for (size_t j(0); j < _localMatrixSize; ++j) {
44             for (size_t k(0); k < 3; ++k) {
45                 _values[i][j] += Integration::Gauss5(J::GetValueAtInverse(k, i / 4) *
    ↪ BasisFunction::getAt(i) *
46                 J::GetValueAtInverse(k, j / 4) * BasisFunction::getAt(j) *
47                 J::GetDeterminant());
48             }
49             _values[i][j] *= _koef; } }
50 }

```

## GlobalVector.h

```

1  #pragma once
2
3  #include "../Logger/Logger.h"
4  #include "Vector.h"
5  #include "LocalVector.h"
6
7  #include <vector>
8  #include <array>
9
10 class GlobalVector : public Vector
11 {
12 private:
13     std::vector<double> _values{};
14     void addLocalVectorValues(const std::array<size_t, 12> localRibs, const LocalVector&
    ↪ b);
15 public:
16     size_t getSize() const override { return _values.size(); }
17     double operator() (size_t i) const override;

```



```

18     double& operator() (size_t i) override;
19     __declspec(property(get = getSize)) size_t Size;
20     GlobalVector();
21     GlobalVector(size_t size) { _values.resize(size); }
22     ~GlobalVector() {}
23     void Fill(std::vector<std::array<size_t, 13>> areas, std::vector<std::array<double,
    ↪ 3>> points,
24             std::vector<std::pair<size_t, size_t>> generatedRibs);
25     void CommitBoundaryConditions(std::vector<std::array<size_t, 6>> borderRibs,
    ↪ std::vector<std::array<double, 3>> points, std::vector<std::pair<size_t, size_t>>
    ↪ generatedRibs);
26     double Norma() const;
27     friend double operator* (const GlobalVector v1, const GlobalVector v2);
28     friend GlobalVector operator* (const double a, const GlobalVector v);
29     friend GlobalVector operator+ (const GlobalVector v1, const GlobalVector v2);
30     friend GlobalVector operator- (const GlobalVector v1, const GlobalVector v2);
31 };
32

```

## GlobalVector.cpp

```

1  #include "GlobalVector.h"
2
3  void GlobalVector::addLocalVectorValues(const std::array<size_t, 12> localRibs, const
    ↪ LocalVector& b) {
4      const std::array<size_t, 12> switchV{
5          0, 3, 8, 11,
6          1, 2, 9, 10,
7          4, 5, 6, 7 };
8      for (size_t i(0); i < b.getSize(); ++i) _values[localRibs[i]] += b(switchV[i]);
9  }
10
11  double GlobalVector::operator()(size_t i) const {
12      if (i >= Size) {
13          Logger::ConsoleOutput("Index run out of Vector range.", NotificationColor::Alert);
14          exit(-1); }
15      return i < Size ? _values[i] : throw "Index run out of Vector range.";
16  }
17
18  double& GlobalVector::operator()(size_t i) {
19      if (i >= Size) {
20          Logger::ConsoleOutput("Index run out of Vector range.", NotificationColor::Alert);
21          exit(-1); }
22      return _values[i];
23  }
24
25  GlobalVector::GlobalVector() {
26      Logger::ConsoleOutput("Global vector initialized, but it's empty",
    ↪ NotificationColor::Warning);
27  }
28
29  void GlobalVector::Fill(std::vector<std::array<size_t, 13>> areas,
    ↪ std::vector<std::array<double, 3>> points,
30                      std::vector<std::pair<size_t, size_t>> generatedRibs) {
31      for (const auto& area : areas) {
32          std::array<size_t, 12> localArea{ area[1], area[4], area[9], area[12],
33              area[2], area[3], area[10], area[11],
34              area[5], area[6], area[7], area[8] };
35          std::array<double, 8> xPoints = { points[generatedRibs[localArea[0]].first][0],
    ↪ points[generatedRibs[localArea[0]].second][0],
36              points[generatedRibs[localArea[1]].first][0],
    ↪ points[generatedRibs[localArea[1]].second][0],
37              points[generatedRibs[localArea[2]].first][0],
    ↪ points[generatedRibs[localArea[2]].second][0],
38              points[generatedRibs[localArea[3]].first][0],
    ↪ points[generatedRibs[localArea[3]].second][0] };
39          std::array<double, 8> yPoints = { points[generatedRibs[localArea[0]].first][1],
    ↪ points[generatedRibs[localArea[0]].second][1],
40              points[generatedRibs[localArea[1]].first][1],
    ↪ points[generatedRibs[localArea[1]].second][1],
41              points[generatedRibs[localArea[2]].first][1],
    ↪ points[generatedRibs[localArea[2]].second][1],

```

```

42         points[generatedRibs[localArea[3]].first][1],
43         ↪ points[generatedRibs[localArea[3]].second][1] };
44     std::array<double, 8> zPoints = { points[generatedRibs[localArea[0]].first][2],
45     ↪ points[generatedRibs[localArea[0]].second][2],
46     ↪ points[generatedRibs[localArea[1]].first][2],
47     ↪ points[generatedRibs[localArea[1]].second][2],
48     ↪ points[generatedRibs[localArea[2]].first][2],
49     ↪ points[generatedRibs[localArea[2]].second][2],
50     ↪ points[generatedRibs[localArea[3]].first][2],
51     ↪ points[generatedRibs[localArea[3]].second][2] };
52     LocalVector b(xPoints, yPoints, zPoints); }
53 }
54
55 void GlobalVector::CommitBoundaryConditions(std::vector<std::array<size_t, 6>>
56 ↪ borderRibs, std::vector<std::array<double, 3>> points, std::vector<std::pair<size_t,
57 ↪ size_t>> generatedRibs) {
58     for (const auto& square : borderRibs) {
59         size_t r0 = square[2]; size_t r1 = square[3];
60         std::array<double, 3> _x = { points[generatedRibs[r0].first][0],
61         ↪ points[generatedRibs[r0].second][0], points[generatedRibs[r1].second][0] };
62         std::array<double, 3> _y = { points[generatedRibs[r0].first][1],
63         ↪ points[generatedRibs[r0].second][1], points[generatedRibs[r1].second][1] };
64         std::array<double, 3> _z = { points[generatedRibs[r0].first][2],
65         ↪ points[generatedRibs[r0].second][2], points[generatedRibs[r1].second][2] };
66         auto getNormal = [_x, _y, _z]() -> vector {
67             auto v = vector{ (_y[1] - _y[0]) * (_z[2] - _z[0]) - (_z[1] - _z[0]) * (_y[2]
68             ↪ - _y[0]),
69             ↪ -1.0 * ((_x[1] - _x[0]) * (_z[2] - _z[0]) - (_z[1] - _z[0]) * (_x[2] -
70             ↪ _x[0])),
71             ↪ (_x[1] - _x[0]) * (_y[2] - _y[0]) - (_y[1] - _y[0]) * (_x[2] - _x[0]) };
72             double len = sqrt(v[0] * v[0] + v[1] * v[1] + v[2] * v[2]);
73             return vector{ v[0] / len, v[1] / len, v[2] / len }; };
74         auto normal = getNormal();
75         switch (square[0]) {
76             case 2: case 3:
77                 Logger::ConsoleOutput("Can't commit boundary conditions of 2nd or 3rd type.",
78                 ↪ NotificationColor::Alert);
79                 exit(-1); break;
80             case 1:
81                 for (size_t ii(2); ii < 6; ++ii) {
82                     std::array<double, 3> middlePoint{ 0.5 *
83                     ↪ (points[generatedRibs[square[ii]].first][0] +
84                     ↪ points[generatedRibs[square[ii]].second][0]),
85                     ↪ 0.5 * (points[generatedRibs[square[ii]].first][1] +
86                     ↪ points[generatedRibs[square[ii]].second][1]),
87                     ↪ 0.5 * (points[generatedRibs[square[ii]].first][2] +
88                     ↪ points[generatedRibs[square[ii]].second][2]), };
89                     auto fVector = Function::TestA(middlePoint[0], middlePoint[1],
90                     ↪ middlePoint[2], 0.0);
91                     auto fValue = fVector[0] * normal[0] + fVector[1] * normal[1] +
92                     ↪ fVector[2] * normal[2];
93                     _values[square[ii]] = fValue;
94                 } break;
95             default: break; } }
96 }
97
98 double GlobalVector::Norma() const {
99     double sum(0.0);
100     for (const auto& value : _values) sum += value * value;
101     return sqrt(sum);
102 }
103
104 double operator*(const GlobalVector v1, const GlobalVector v2) {
105     if (v1.Size != v2.Size) Logger::ConsoleOutput("During vector multiplication vectors
106     ↪ have different size", NotificationColor::Alert);
107     double sum(0.0);
108     for (size_t i(0); i < v1.Size; ++i) sum += v1(i) * v2(i);
109     return sum;
110 }
111
112 GlobalVector operator*(const double a, const GlobalVector v) {
113     GlobalVector result(v.Size);
114     for (size_t i(0); i < v.Size; ++i) result(i) = a * v(i);
115     return result;
116 }

```

```

96 }
97
98 GlobalVector operator+(const GlobalVector v1, const GlobalVector v2) {
99     if (v1.Size != v2.Size) Logger::ConsoleOutput("During vector multiplication vectors
    ↳ have different size", NotificationColor::Alert);
100     GlobalVector result(v1.Size);
101     for (size_t i(0); i < v1.Size; ++i) result(i) = v1(i) + v2(i);
102     return result;
103 }
104
105 GlobalVector operator-(const GlobalVector v1, const GlobalVector v2) {
106     if (v1.Size != v2.Size) Logger::ConsoleOutput("During vector multiplication vectors
    ↳ have different size", NotificationColor::Alert);
107     GlobalVector result(v1.Size);
108     for (size_t i(0); i < v1.Size; ++i) result(i) = v1(i) - v2(i);
109     return result;
110 }

```

## LocalVector.h

```

1  #pragma once
2
3  #include "Vector.h"
4  #include "LocalMatrix.h"
5  #include "..\Functions\Function.h"
6
7  class LocalVector : public Vector {
8  public:
9      LocalVector() {};
10     LocalVector(std::array<double, 8> x, std::array<double, 8> y, std::array<double, 8>
    ↳ z) : _x(x), _y(y), _z(z) {
11         M = new LocalMatrix(1.0, _x, _y, _z, LMType::Mass);
12         generate();
13     }
14     ~LocalVector() {};
15     double operator() (size_t i) const override { return _values[i]; }
16     double& operator() (size_t i) override { return _values[i]; }
17     size_t getSize() const override { return 12; }
18 private:
19     std::array<double, 8> _x{};
20     std::array<double, 8> _y{};
21     std::array<double, 8> _z{};
22     std::array<double, 12> _values{};
23     void generate();
24     LocalMatrix* M = nullptr;
25 };

```

## LocalVector.cpp

```

1  #include "LocalVector.h"
2
3  #include <iostream>
4
5  void LocalVector::generate() {
6      auto findLen = [](vector v) {return sqrt(v[0] * v[0] + v[1] * v[1] + v[2] * v[2]); };
7      auto scMult = [](vector v1, vector v2) { return v1[0] * v2[0] + v1[1] * v2[1] + v1[2]
    ↳ * v2[2]; };
8      std::array<vector, 12> diffVec = {
9          vector{_x[1] - _x[0], _y[1] - _y[0], _z[1] - _z[0]},
10         vector{_x[3] - _x[2], _y[3] - _y[2], _z[3] - _z[2]},
11         vector{_x[5] - _x[4], _y[5] - _y[4], _z[5] - _z[4]},
12         vector{_x[7] - _x[6], _y[7] - _y[6], _z[7] - _z[6]},
13         vector{_x[2] - _x[0], _y[2] - _y[0], _z[2] - _z[0]},
14         vector{_x[3] - _x[1], _y[3] - _y[1], _z[3] - _z[1]},
15         vector{_x[6] - _x[4], _y[6] - _y[4], _z[6] - _z[4]},
16         vector{_x[7] - _x[5], _y[7] - _y[5], _z[7] - _z[5]},
17         vector{_x[4] - _x[0], _y[4] - _y[0], _z[4] - _z[0]},
18         vector{_x[5] - _x[1], _y[5] - _y[1], _z[5] - _z[1]},
19         vector{_x[6] - _x[2], _y[6] - _y[2], _z[6] - _z[2]},

```

```

20     vector{_x[7] - _x[3], _y[7] - _y[3], _z[7] - _z[3]}};
21     std::array<double, 12> vf = {
22         scMult(Function::TestF1(_x[0] + 0.5 * diffVec[0][0], _y[0] + 0.5 * diffVec[0][1],
23             ↪ _z[0] + 0.5 * diffVec[0][2], 0.0), diffVec[0]) / findLen(diffVec[0]),
24         scMult(Function::TestF1(_x[2] + 0.5 * diffVec[2][0], _y[2] + 0.5 * diffVec[2][1],
25             ↪ _z[2] + 0.5 * diffVec[2][2], 0.0), diffVec[2]) / findLen(diffVec[2]),
26         scMult(Function::TestF1(_x[4] + 0.5 * diffVec[4][0], _y[4] + 0.5 * diffVec[4][1],
27             ↪ _z[4] + 0.5 * diffVec[4][2], 0.0), diffVec[4]) / findLen(diffVec[4]),
28         scMult(Function::TestF1(_x[6] + 0.5 * diffVec[6][0], _y[6] + 0.5 * diffVec[6][1],
29             ↪ _z[6] + 0.5 * diffVec[6][2], 0.0), diffVec[6]) / findLen(diffVec[6]),
30         scMult(Function::TestF1(_x[0] + 0.5 * diffVec[0][0], _y[0] + 0.5 * diffVec[0][1],
31             ↪ _z[0] + 0.5 * diffVec[0][2], 0.0), diffVec[0]) / findLen(diffVec[0]),
32         scMult(Function::TestF1(_x[1] + 0.5 * diffVec[1][0], _y[1] + 0.5 * diffVec[1][1],
33             ↪ _z[1] + 0.5 * diffVec[1][2], 0.0), diffVec[1]) / findLen(diffVec[1]),
34         scMult(Function::TestF1(_x[4] + 0.5 * diffVec[4][0], _y[4] + 0.5 * diffVec[4][1],
35             ↪ _z[4] + 0.5 * diffVec[4][2], 0.0), diffVec[4]) / findLen(diffVec[4]),
36         scMult(Function::TestF1(_x[5] + 0.5 * diffVec[5][0], _y[5] + 0.5 * diffVec[5][1],
37             ↪ _z[5] + 0.5 * diffVec[5][2], 0.0), diffVec[5]) / findLen(diffVec[5]),
38         scMult(Function::TestF1(_x[0] + 0.5 * diffVec[0][0], _y[0] + 0.5 * diffVec[0][1],
39             ↪ _z[0] + 0.5 * diffVec[0][2], 0.0), diffVec[0]) / findLen(diffVec[0]),
40         scMult(Function::TestF1(_x[1] + 0.5 * diffVec[1][0], _y[1] + 0.5 * diffVec[1][1],
41             ↪ _z[2] + 0.5 * diffVec[1][2], 0.0), diffVec[1]) / findLen(diffVec[1]),
42         scMult(Function::TestF1(_x[2] + 0.5 * diffVec[2][0], _y[2] + 0.5 * diffVec[2][1],
43             ↪ _z[4] + 0.5 * diffVec[2][2], 0.0), diffVec[2]) / findLen(diffVec[2]),
44         scMult(Function::TestF1(_x[3] + 0.5 * diffVec[3][0], _y[3] + 0.5 * diffVec[3][1],
45             ↪ _z[6] + 0.5 * diffVec[3][2], 0.0), diffVec[3]) / findLen(diffVec[3]), };
46     for (size_t i(0); i < 12; ++i)
47         for (size_t j(0); j < 12; ++j)
48             _values[i] += M->operator()(i, j) * vf[j];
49 }

```

## JacobiMatrix.h

```

1  #pragma once
2
3  #include <functional>
4  #include <array>
5
6  class JacobiMatrix {
7  private:
8      // Points arrays.
9      static std::array<double, 8> _x;
10     static std::array<double, 8> _y;
11     static std::array<double, 8> _z;
12     // Template functions.
13     static inline double const W(double t) { return 0.5 * (1.0 - t); }
14     static inline double const W(double t) { return 0.5 * (1.0 + t); }
15 public:
16     JacobiMatrix() = delete;
17     static void SetValues(std::array<double, 8> x, std::array<double, 8> y,
18         ↪ std::array<double, 8> z);
19     static inline double dxde(double eps, double eta, double zeta);
20     static inline double dyde(double eps, double eta, double zeta);
21     static inline double dzde(double eps, double eta, double zeta);
22     static inline double dxdn(double eps, double eta, double zeta);
23     static inline double dydn(double eps, double eta, double zeta);
24     static inline double dzdn(double eps, double eta, double zeta);
25     static inline double dxdc(double eps, double eta, double zeta);
26     static inline double dydc(double eps, double eta, double zeta);
27     static inline double dzdc(double eps, double eta, double zeta);
28     static std::function<double(double, double, double)> const GetValueAt(size_t i,
29         ↪ size_t j);
30     static std::function<double(double, double, double)> const GetValueAtInverse(size_t
31         ↪ i, size_t j);
32     static std::function<double(double, double, double)> const
33         ↪ GetValueAtTransposed(size_t i, size_t j);
34     static std::function<double(double, double, double)> const GetDeterminant();
35 }

```

## JacobiMatrix.cpp

```

1  #include "JacobiMatrix.h"
2
3  std::array<double, 8> JacobiMatrix::_x = {};
4  std::array<double, 8> JacobiMatrix::_y = {};
5  std::array<double, 8> JacobiMatrix::_z = {};
6
7  inline double JacobiMatrix::dxde(double eps, double eta, double zeta) {
8      return 0.5 * (W_(eta) * W_(zeta) * (_x[1] - _x[0]) +
9                  W_(eta) * W_(zeta) * (_x[3] - _x[2]) +
10                 W_(eta) * W_(zeta) * (_x[5] - _x[4]) +
11                 W_(eta) * W_(zeta) * (_x[7] - _x[6])); }
12
13  inline double JacobiMatrix::dyde(double eps, double eta, double zeta) {
14      return 0.5 * (W_(eta) * W_(zeta) * (_y[1] - _y[0]) +
15                  W_(eta) * W_(zeta) * (_y[3] - _y[2]) +
16                 W_(eta) * W_(zeta) * (_y[5] - _y[4]) +
17                 W_(eta) * W_(zeta) * (_y[7] - _y[6])); }
18
19  inline double JacobiMatrix::dzde(double eps, double eta, double zeta) {
20      return 0.5 * (W_(eta) * W_(zeta) * (_z[1] - _z[0]) +
21                  W_(eta) * W_(zeta) * (_z[3] - _z[2]) +
22                 W_(eta) * W_(zeta) * (_z[5] - _z[4]) +
23                 W_(eta) * W_(zeta) * (_z[7] - _z[6])); }
24
25  inline double JacobiMatrix::dxdn(double eps, double eta, double zeta) {
26      return 0.5 * (W_(eps) * W_(zeta) * (_x[2] - _x[0]) +
27                  W_(eps) * W_(zeta) * (_x[3] - _x[1]) +
28                 W_(eps) * W_(zeta) * (_x[6] - _x[4]) +
29                 W_(eps) * W_(zeta) * (_x[7] - _x[5])); }
30
31  inline double JacobiMatrix::dydn(double eps, double eta, double zeta) {
32      return 0.5 * (W_(eps) * W_(zeta) * (_y[2] - _y[0]) +
33                  W_(eps) * W_(zeta) * (_y[3] - _y[1]) +
34                 W_(eps) * W_(zeta) * (_y[6] - _y[4]) +
35                 W_(eps) * W_(zeta) * (_y[7] - _y[5])); }
36
37  inline double JacobiMatrix::dzdn(double eps, double eta, double zeta) {
38      return 0.5 * (W_(eps) * W_(zeta) * (_z[2] - _z[0]) +
39                  W_(eps) * W_(zeta) * (_z[3] - _z[1]) +
40                 W_(eps) * W_(zeta) * (_z[6] - _z[4]) +
41                 W_(eps) * W_(zeta) * (_z[7] - _z[5])); }
42
43
44  inline double JacobiMatrix::dxdc(double eps, double eta, double zeta) {
45      return 0.5 * (W_(eps) * W_(eta) * (_x[4] - _x[0]) +
46                  W_(eps) * W_(eta) * (_x[5] - _x[1]) +
47                 W_(eps) * W_(eta) * (_x[6] - _x[2]) +
48                 W_(eps) * W_(eta) * (_x[7] - _x[3])); }
49
50  inline double JacobiMatrix::dydc(double eps, double eta, double zeta) {
51      return 0.5 * (W_(eps) * W_(eta) * (_y[4] - _y[0]) +
52                  W_(eps) * W_(eta) * (_y[5] - _y[1]) +
53                 W_(eps) * W_(eta) * (_y[6] - _y[2]) +
54                 W_(eps) * W_(eta) * (_y[7] - _y[3])); }
55
56  inline double JacobiMatrix::dzdc(double eps, double eta, double zeta) {
57      return 0.5 * (W_(eps) * W_(eta) * (_z[4] - _z[0]) +
58                  W_(eps) * W_(eta) * (_z[5] - _z[1]) +
59                 W_(eps) * W_(eta) * (_z[6] - _z[2]) +
60                 W_(eps) * W_(eta) * (_z[7] - _z[3])); }
61
62
63  void JacobiMatrix::SetValues(std::array<double, 8> x, std::array<double, 8> y,
64      ↪ std::array<double, 8> z) {
65      _x = x; _y = y; _z = z; }
66
67  std::function<double(double, double, double)> const JacobiMatrix::GetValueAt(size_t i,
68      ↪ size_t j) {
69      if (i == 0 and j == 0) return dxde;
70      if (i == 0 and j == 1) return dyde;
71      if (i == 0 and j == 2) return dzde;
72      if (i == 1 and j == 0) return dxdn;
73      if (i == 1 and j == 1) return dydn;

```

```

72     if (i == 1 and j == 2) return dzdn;
73     if (i == 2 and j == 0) return dxdc;
74     if (i == 2 and j == 1) return dydc;
75     if (i == 2 and j == 2) return dzdc;
76 }
77
78 std::function<double(double, double, double)> const
79   ↳ JacobiMatrix::GetValueAtInverse(size_t i, size_t j) {
80     if (i == 0 and j == 0)
81       return [](double t0, double t1, double t2) { return (dydn(t0, t1, t2) * dzdc(t0,
82         ↳ t1, t2) -
83         dydc(t0, t1, t2) * dzdn(t0, t1, t2)) / GetDeterminant()(t0, t1, t2); };
84     if (i == 0 and j == 1)
85       return [](double t0, double t1, double t2) { return -1.0 * (dyde(t0, t1, t2) *
86         ↳ dzdc(t0, t1, t2) -
87         dydc(t0, t1, t2) * dzde(t0, t1, t2)) / GetDeterminant()(t0, t1, t2); };
88     if (i == 0 and j == 2)
89       return [](double t0, double t1, double t2) { return (dyde(t0, t1, t2) * dzdn(t0,
90         ↳ t1, t2) -
91         dydn(t0, t1, t2) * dzde(t0, t1, t2)) / GetDeterminant()(t0, t1, t2); };
92     if (i == 1 and j == 0)
93       return [](double t0, double t1, double t2) { return -1.0 * (dxdn(t0, t1, t2) *
94         ↳ dzdc(t0, t1, t2) -
95         dxdc(t0, t1, t2) * dzdn(t0, t1, t2)) / GetDeterminant()(t0, t1, t2); };
96     if (i == 1 and j == 1)
97       return [](double t0, double t1, double t2) { return (dxde(t0, t1, t2) * dzdc(t0,
98         ↳ t1, t2) -
99         dxdc(t0, t1, t2) * dzde(t0, t1, t2)) / GetDeterminant()(t0, t1, t2); };
100    if (i == 1 and j == 2)
101      return [](double t0, double t1, double t2) { return -1.0 * (dxde(t0, t1, t2) *
102        ↳ dzdn(t0, t1, t2) -
103        dxdn(t0, t1, t2) * dzde(t0, t1, t2)) / GetDeterminant()(t0, t1, t2); };
104    if (i == 2 and j == 0)
105      return [](double t0, double t1, double t2) { return (dxdn(t0, t1, t2) * dydc(t0,
106        ↳ t1, t2) -
107        dxdc(t0, t1, t2) * dydn(t0, t1, t2)) / GetDeterminant()(t0, t1, t2); };
108    if (i == 2 and j == 1)
109      return [](double t0, double t1, double t2) { return -1.0 * (dxde(t0, t1, t2) *
110        ↳ dydc(t0, t1, t2) -
111        dxdc(t0, t1, t2) * dyde(t0, t1, t2)) / GetDeterminant()(t0, t1, t2); };
112    if (i == 2 and j == 2)
113      return [](double t0, double t1, double t2) { return (dxde(t0, t1, t2) * dydn(t0,
114        ↳ t1, t2) -
115        dxdn(t0, t1, t2) * dyde(t0, t1, t2)) / GetDeterminant()(t0, t1, t2); };
116  }
117
118 std::function<double(double, double, double)> const
119   ↳ JacobiMatrix::GetValueAtTransposed(size_t i, size_t j) { return GetValueAt(j, i); }
120
121 std::function<double(double, double, double)> const JacobiMatrix::GetDeterminant() {
122   return [](double t0, double t1, double t2) { return
123     dxde(t0, t1, t2) * dydn(t0, t1, t2) * dzdc(t0, t1, t2) +
124     dyde(t0, t1, t2) * dzdn(t0, t1, t2) * dxdc(t0, t1, t2) +
125     dzde(t0, t1, t2) * dxdn(t0, t1, t2) * dydc(t0, t1, t2) -
126     dzdn(t0, t1, t2) * dydn(t0, t1, t2) * dxdc(t0, t1, t2) -
127     dyde(t0, t1, t2) * dxdn(t0, t1, t2) * dzdc(t0, t1, t2) -
128     dxde(t0, t1, t2) * dzdn(t0, t1, t2) * dydc(t0, t1, t2); };
129 }

```

## Mesh.h

```

1  #pragma once
2
3  #include <cassert>
4  #include <cmath>
5  #include <string>
6  #include <algorithm>
7
8  #include "../DataTypes.h"
9  #include "../Logger/Logger.h"
10

```

```

11 class Mesh {
12 private:
13     // Based.
14     bool isGenerated_ = false;
15     bool isDeclared_ = false;
16     size_t linesAmountX_ = 0;
17     size_t linesAmountY_ = 0;
18     size_t linesAmountZ_ = 0;
19     std::vector<Point> points_{};
20     size_t subdomainsAmount_ = 0;
21     std::vector<std::array<size_t, 7>> subdomains_{};
22     std::vector<AreaInfo> areasInfo_{};
23     std::vector<AreaRibs> areasRibs_{};
24     std::vector<std::pair<size_t, double_t>> delimitersX_{};
25     std::vector<std::pair<size_t, double_t>> delimitersY_{};
26     std::vector<std::pair<size_t, double_t>> delimitersZ_{};
27     size_t bordersAmount_ = 0;
28     std::vector<Border> borders_{};
29     std::vector<BorderLine> borderRibs_{};
30     std::vector<std::array<size_t, 6>> newBorders_{};
31     std::vector<AreaPoints> areasPoints_{};
32     std::vector<RibRef> referableRibs_{};
33     // Additional.
34     std::vector<Point> immutablePoints_{};
35     std::vector<std::array<size_t, 7>> immutableSubdomains_{};
36     std::vector<Border> immutableBorders_{};
37     std::vector<size_t> numRefsOfLinesAboveX{};
38     std::vector<size_t> numRefsOfLinesAboveY{};
39     std::vector<size_t> numRefsOfLinesAboveZ{};
40     void organizeBorders();
41 public:
42     Mesh() { Logger::ConsoleOutput("Mesh declared, but it's empty.",
43     ↪ NotificationColor::Warning); };
44     ~Mesh() {};
45     bool CheckData();
46     void CommitData(std::vector<std::string>* data);
47     inline bool isGenerated() const { return isGenerated_; }
48     inline bool isDeclared() const { return isDeclared_; }
49     inline size_t getLinesAmountX() const { return linesAmountX_; }
50     inline size_t getLinesAmountY() const { return linesAmountY_; }
51     inline size_t getLinesAmountZ() const { return linesAmountZ_; }
52     inline std::vector<Point> getPoints() const { return points_; }
53     inline std::vector<AreaRibs> getAreasAsRibs() const { return areasRibs_; }
54     inline std::vector<RibRef> getRibsRefs() const { return referableRibs_; }
55     inline std::vector<Border> getBorders() const { return borders_; }
56     inline std::vector<BorderLine> getBorderRibs() const { return borderRibs_; }
57     inline std::vector<std::array<size_t, 6>> getNewBorderRibs() const { return
58     ↪ newBorders_; }
59     inline std::vector<AreaInfo> getAreaInfo() const { return areasInfo_; }
60     __declspec(property(get = getLinesAmountX)) size_t LinesAmountX;
61     __declspec(property(get = getLinesAmountY)) size_t LinesAmountY;
62     __declspec(property(get = getLinesAmountZ)) size_t LinesAmountZ;
63     __declspec(property(get = isGenerated)) bool IsGenerated;
64     __declspec(property(get = isDeclared)) bool IsDeclared;
65     __declspec(property(get = getPoints)) std::vector<Point> Points;
66     __declspec(property(get = getAreaInfo)) std::vector<AreaInfo> AreasInfo;
67     friend class MeshGenerator;
68 };

```

## Mesh.cpp

```

1  #include "Mesh.h"
2
3  void Mesh::organizeBorders() {
4      size_t bordersIISwifted(0); size_t bordersIIISwifted(0);
5      for (auto& border : borders_) {
6          if (border.type_ == 2) {
7              std::iter_swap(borders_.begin() + bordersIISwifted, &border);
8              bordersIISwifted++; }
9          if (border.type_ == 3) {
10             std::iter_swap(borders_.begin() + bordersIISwifted + bordersIIISwifted,
11             ↪ &border);

```

```

11         bordersIIISwifted++; } }
12     }
13
14     bool Mesh::CheckData() {
15         if (linesAmountX_ * linesAmountY_ * linesAmountZ_ != points_.size()) return false;
16         if (linesAmountX_ - 1 != delimitersX_.size()) return false;
17         if (linesAmountY_ - 1 != delimitersY_.size()) return false;
18         if (linesAmountZ_ - 1 != delimitersZ_.size()) return false;
19         size_t maxLineX = 0; size_t maxLineY = 0; size_t maxLineZ = 0;
20         for (const auto& subdomain : subdomains_) {
21             maxLineX = maxLineX < subdomain[2] ? subdomain[2] : maxLineX;
22             maxLineY = maxLineY < subdomain[4] ? subdomain[4] : maxLineY;
23             maxLineZ = maxLineZ < subdomain[6] ? subdomain[6] : maxLineZ; }
24         if (linesAmountX_ - 1 != maxLineX) return false;
25         if (linesAmountY_ - 1 != maxLineY) return false;
26         if (linesAmountZ_ - 1 != maxLineZ) return false;
27         Logger::ConsoleOutput("Mesh checked and declared.", NotificationColor::Passed);
28         isDeclarated_ = true; return true;
29     }
30
31     void Mesh::CommitData(std::vector<std::string>* data) {
32         auto currentItem = data->begin(); // Select first item of vector.
33         // Commit lines amount above X,Y,Z axis.
34         linesAmountX_ = std::stoul(*currentItem); currentItem++;
35         linesAmountY_ = std::stoul(*currentItem); currentItem++;
36         linesAmountZ_ = std::stoul(*currentItem); currentItem++;
37         // Commit area description.
38         for (size_t i(0); i < linesAmountX_ * linesAmountY_ * linesAmountZ_; ++i) {
39             points_.emplace_back(std::stod(*currentItem), // X
40                                 std::stod(*(currentItem + 1)), // Y
41                                 std::stod(*(currentItem + 2))); // Z
42             currentItem += 3; }
43         immutablePoints_ = points_;
44         // Commit unique areas description.
45         subdomainsAmount_ = std::stoul(*currentItem); currentItem++;
46         for (size_t i(0); i < subdomainsAmount_; ++i) {
47             std::array<size_t, 7> currentArray = { std::stoul(*currentItem), // Formula num.
48                                                     std::stoul(*(currentItem + 1)), // X0.
49                                                     std::stoul(*(currentItem + 2)), // X1.
50                                                     std::stoul(*(currentItem + 3)), // Y0.
51                                                     std::stoul(*(currentItem + 4)), // Y1.
52                                                     std::stoul(*(currentItem + 5)), // Z0.
53                                                     std::stoul(*(currentItem + 6)) }; // Z1.
54             subdomains_.push_back(currentArray);
55             currentItem += 7; }
56         immutableSubdomains_ = subdomains_;
57         // Commit unique areas coefficients description.
58         for (size_t i(0); i < subdomainsAmount_; ++i) {
59             areasInfo_.emplace_back(std::stoul(*currentItem), // Area num.
60                                     std::stod(*(currentItem + 1)), // Mu_i.
61                                     std::stod(*(currentItem + 2))); // Sigma_i.
62             currentItem += 3; }
63         // Commit delimiters above X description.
64         for (size_t i(0); i < linesAmountX_ - 1; ++i) {
65             delimitersX_.emplace_back(std::stoul(*currentItem),
66                                       std::stod(*(currentItem + 1)));
67             currentItem += 2; }
68         // Commit delimiters above Y description.
69         for (size_t i(0); i < linesAmountY_ - 1; ++i) {
70             delimitersY_.emplace_back(std::stoul(*currentItem),
71                                       std::stod(*(currentItem + 1)));
72             currentItem += 2; }
73         // Commit delimiters above Z description.
74         for (size_t i(0); i < linesAmountZ_ - 1; ++i) {
75             delimitersZ_.emplace_back(std::stoul(*currentItem),
76                                       std::stod(*(currentItem + 1)));
77             currentItem += 2; }
78         // Commit information about borders.
79         bordersAmount_ = std::stoul(*currentItem); currentItem++;
80         for (size_t i(0); i < bordersAmount_; ++i) {
81             borders_.emplace_back(std::stoul(*currentItem), // Border type.
82                                   std::stoul(*(currentItem + 1)), // Border formula num.
83                                   std::stoul(*(currentItem + 2)), // X0.
84                                   std::stoul(*(currentItem + 3)), // X1.
85                                   std::stoul(*(currentItem + 4)), // Y0.

```



```

86         std::stoul(*(currentItem + 5)),          // Y1.
87         std::stoul(*(currentItem + 6)),          // Z0.
88         std::stoul(*(currentItem + 7)));         // Z1.
89         currentItem += 8; }
90     organizeBorders(); immutableBorders_ = borders_;
91 }

```

## MeshGenerator.h

```

1  #pragma once
2
3  #include "Mesh.h"
4
5  #include <cassert>
6  #include <vector>
7
8  typedef std::vector<std::vector<std::vector<Point>>> area3D;
9  typedef std::vector<std::vector<Point>> square2D;
10 typedef std::vector<Point> line1D;
11
12 class MeshGenerator {
13 private:
14     static int SelectAreaNum(Mesh& mesh, std::array<size_t, 12> arr);
15     static void GenerateListOfPoints(Mesh& mesh);
16     static void GenerateListOfAreas(Mesh& mesh);
17     static void GenerateListOfRibs(Mesh& mesh);
18     static void GenerateListOfBorders(Mesh& mesh);
19 public:
20     MeshGenerator() = delete;
21     static void Generate3DMesh(Mesh& mesh);
22 };

```

## MeshGenerator.cpp

```

1  #include "MeshGenerator.h"
2
3  void MeshGenerator::Generate3DMesh(Mesh& mesh) {
4      assert(mesh.IsDeclared);
5      for (size_t i(0); i < mesh.LinesAmountX; ++i) mesh.numRefsOfLinesAboveX.push_back(i);
6      for (size_t i(0); i < mesh.LinesAmountY; ++i) mesh.numRefsOfLinesAboveY.push_back(i);
7      for (size_t i(0); i < mesh.LinesAmountZ; ++i) mesh.numRefsOfLinesAboveZ.push_back(i);
8      GenerateListOfPoints(mesh); GenerateListOfRibs(mesh);
9      GenerateListOfAreas(mesh); GenerateListOfBorders(mesh);
10 }
11
12 int MeshGenerator::SelectAreaNum(Mesh& mesh, std::array<size_t, 12> arr) {
13     auto sxy = mesh.LinesAmountX * mesh.LinesAmountY;
14     auto p1 = mesh.referableRibs_[arr[0]].p1;
15     auto p2 = mesh.referableRibs_[arr[11]].p2;
16     auto lx0 = p1 % mesh.LinesAmountX;
17     auto lx1 = p2 % mesh.LinesAmountX;
18     auto ly0 = (p1 % sxy) / mesh.LinesAmountX;
19     auto ly1 = (p2 % sxy) / mesh.LinesAmountX;
20     auto lz0 = p1 / sxy; auto lz1 = p2 / sxy;
21     for (const auto& area : mesh.subdomains_)
22         if (mesh.numRefsOfLinesAboveX[area[1]] <= lx0 and
23             lx1 <= mesh.numRefsOfLinesAboveX[area[2]] and
24             mesh.numRefsOfLinesAboveY[area[3]] <= ly0 and
25             ly1 <= mesh.numRefsOfLinesAboveY[area[4]] and
26             mesh.numRefsOfLinesAboveZ[area[5]] <= lz0 and
27             lz1 <= mesh.numRefsOfLinesAboveZ[area[6]])
28             return area[0];
29     Logger::ConsoleOutput("Error during selection of area num", NotificationColor::Alert);
30     return NAN;
31 }
32
33 // Try to optimize memory.
34 void MeshGenerator::GenerateListOfPoints(Mesh& mesh) {
35     // Construct 3D area.
36     area3D figure{};

```

```

37 figure.resize(mesh.LinesAmountZ);
38 for (auto& square : figure) {
39     square.resize(mesh.LinesAmountY);
40     for (auto& line : square) line.resize(mesh.LinesAmountX); }
41 // Fill 3D area.
42 auto sxy = mesh.LinesAmountX * mesh.LinesAmountY;
43 auto lx = mesh.LinesAmountX;
44 for (size_t k(0); k < mesh.LinesAmountZ; ++k)
45     for (size_t j(0); j < mesh.LinesAmountY; ++j)
46         for (size_t i(0); i < mesh.LinesAmountX; ++i)
47             figure[k][j][i] = mesh.immutablePoints_[k * sxy + j * lx + i];
48 // Generation above X-axis.
49 for (size_t k(0); k < mesh.LinesAmountZ; ++k) {
50     for (size_t j(0); j < mesh.LinesAmountY; ++j) {
51         line1D lineToBuild{};
52         lineToBuild = figure[k][j];
53         size_t shift = mesh.LinesAmountX - 1;
54         auto iterOnXRefs = mesh.numRefsOfLinesAboveX.begin() + 1;
55         for (const auto& info : mesh.delimitersX_) {
56             auto rightBorderIter = lineToBuild.end() - shift;
57             auto amountOfDelimiters = info.first;
58             auto coefficientOfDelimiter = info.second;
59             *iterOnXRefs = *(iterOnXRefs - 1) + amountOfDelimiters;
60             iterOnXRefs++;
61             double denum = 0.0;
62             for (size_t ii(0); ii < amountOfDelimiters; ++ii)
63                 denum += pow(coefficientOfDelimiter, ii);
64             double x0 = (*(rightBorderIter - 1)).x; double x1 = (*rightBorderIter).x;
65             double y0 = (*(rightBorderIter - 1)).y; double y1 = (*rightBorderIter).y;
66             double z0 = (*(rightBorderIter - 1)).z; double z1 = (*rightBorderIter).z;
67             double deltax = x1 - x0; double deltay = y1 - y0; double deltax = z1 - z0;
68             double xh = deltax / denum; double yh = deltay / denum;
69             double zh = deltax / denum; double multiplier = 0.0;
70             for (size_t ii(0); ii < amountOfDelimiters - 1; ++ii) {
71                 multiplier += pow(coefficientOfDelimiter, ii);
72                 auto pointToInsert = Point(x0 + xh * multiplier,
73                     y0 + yh * multiplier, z0 + zh * multiplier);
74                 lineToBuild.insert(lineToBuild.end() - shift, pointToInsert);
75             } shift--;
76         } figure[k][j] = lineToBuild;
77     }
78 } mesh.linesAmountX_ = figure[0][0].size();
79 // Generation above Y-axis.
80 for (size_t k(0); k < mesh.LinesAmountZ; ++k) {
81     square2D squareToBuild{};
82     squareToBuild = figure[k];
83     size_t shift = mesh.LinesAmountY - 1;
84     auto iterOnYRefs = mesh.numRefsOfLinesAboveY.begin() + 1;
85     for (const auto& info : mesh.delimitersY_) {
86         auto rightBorderIter = squareToBuild.end() - shift;
87         auto amountOfDelimiters = info.first;
88         auto coefficientOfDelimiter = info.second;
89         *iterOnYRefs = *(iterOnYRefs - 1) + amountOfDelimiters;
90         iterOnYRefs++;
91         line1D v0(mesh.LinesAmountX); line1D v1(mesh.LinesAmountX);
92         std::copy((*(rightBorderIter - 1)).begin(), (*(rightBorderIter - 1)).end(),
93             ↪ v0.begin());
94         std::copy((*(rightBorderIter)).begin(), (*(rightBorderIter)).end(),
95             ↪ v1.begin());
96         square2D subSquareToBuild(amountOfDelimiters - 1);
97         for (auto& line : subSquareToBuild) line.resize(mesh.LinesAmountX);
98         double denum = 0.0;
99         for (size_t ii(0); ii < amountOfDelimiters; ++ii)
100             denum += pow(coefficientOfDelimiter, ii);
101         for (size_t i(0); i < mesh.LinesAmountX; ++i) {
102             double x0 = v0[i].x; double x1 = v1[i].x;
103             double y0 = v0[i].y; double y1 = v1[i].y;
104             double z0 = v0[i].z; double z1 = v1[i].z;
105             double deltax = x1 - x0; double deltay = y1 - y0; double deltax = z1 - z0;
106             double xh = deltax / denum; double yh = deltay / denum;
107             double zh = deltax / denum; double multiplier = 0.0;
108             for (size_t ii(0); ii < amountOfDelimiters - 1; ++ii) {
109                 multiplier += pow(coefficientOfDelimiter, ii);
110                 auto pointToInsert = Point(x0 + xh * multiplier,
111                     y0 + yh * multiplier, z0 + zh * multiplier);
112                 subSquareToBuild[ii][i] = pointToInsert;

```

```

111     }}
112     for (auto line : subSquareToBuild)
113         squareToBuild.insert(squareToBuild.end() - shift, line);
114     shift--;
115     } figure[k] = squareToBuild;
116 } mesh.linesAmountY_ = figure[0].size();
117 // Generate above Z-axis.
118 area3D areaToBuild{};
119 areaToBuild = figure;
120 size_t shift = mesh.LinesAmountZ - 1;
121 auto iterOnZRefs = mesh.numRefsOfLinesAboveZ.begin() + 1;
122 for (const auto& info : mesh.delimitersZ_) {
123     auto rightBorderIter = areaToBuild.end() - shift;
124     auto amountOfDelimiters = info.first;
125     auto coefficientOfDelimiter = info.second;
126     *iterOnZRefs = *(iterOnZRefs - 1) + amountOfDelimiters;
127     iterOnZRefs++;
128     square2D s0(mesh.LinesAmountY); for (auto& line : s0)
129         line.resize(mesh.LinesAmountX);
130     square2D s1(mesh.LinesAmountY); for (auto& line : s1)
131         line.resize(mesh.LinesAmountX);
132     std::copy((*(rightBorderIter - 1)).begin(), (*(rightBorderIter - 1)).end(),
133             s0.begin());
134     std::copy((*(rightBorderIter)).begin(), (*(rightBorderIter)).end(), s1.begin());
135     area3D subAreaToBuild(amountOfDelimiters - 1);
136     for (auto& square : subAreaToBuild) {
137         square.resize(mesh.LinesAmountY);
138         for (auto& line : square)
139             line.resize(mesh.LinesAmountX); }
140     double denum = 0.0;
141     for (size_t ii(0); ii < amountOfDelimiters; ++ii)
142         denum += pow(coefficientOfDelimiter, ii);
143     for (size_t j(0); j < mesh.LinesAmountY; ++j) {
144         for (size_t i(0); i < mesh.LinesAmountX; ++i) {
145             double x0 = s0[j][i].x; double x1 = s1[j][i].x;
146             double y0 = s0[j][i].y; double y1 = s1[j][i].y;
147             double z0 = s0[j][i].z; double z1 = s1[j][i].z;
148             double delTX = x1 - x0; double delTY = y1 - y0;
149             double delTZ = z1 - z0;
150             double xh = delTX / denum;
151             double yh = delTY / denum;
152             double zh = delTZ / denum;
153             double multiplier = 0.0;
154             for (size_t ii(0); ii < amountOfDelimiters - 1; ++ii) {
155                 multiplier += pow(coefficientOfDelimiter, ii);
156                 auto pointToInsert = Point(x0 + xh * multiplier,
157                                             y0 + yh * multiplier,
158                                             z0 + zh * multiplier);
159                 subAreaToBuild[ii][j][i] = pointToInsert; } } }
160     for (auto square : subAreaToBuild)
161         areaToBuild.insert(areaToBuild.end() - shift, square);
162     shift--;
163 } figure = areaToBuild;
164 mesh.linesAmountZ_ = figure.size();
165 // Convert borders array.
166 for (auto& border : mesh.borders_) {
167     border.refs_[0] = mesh.numRefsOfLinesAboveX[border.refs_[0]];
168     border.refs_[1] = mesh.numRefsOfLinesAboveX[border.refs_[1]];
169     border.refs_[2] = mesh.numRefsOfLinesAboveY[border.refs_[2]];
170     border.refs_[3] = mesh.numRefsOfLinesAboveY[border.refs_[3]];
171     border.refs_[4] = mesh.numRefsOfLinesAboveZ[border.refs_[4]];
172     border.refs_[5] = mesh.numRefsOfLinesAboveZ[border.refs_[5]]; }
173 // Convert to line-format.
174 mesh.linesAmountZ_ = figure.size();
175 mesh.points_.resize(mesh.linesAmountX * mesh.linesAmountY * mesh.linesAmountZ_);
176 sxy = mesh.LinesAmountX * mesh.LinesAmountY;
177 lx = mesh.LinesAmountX;
178 for (size_t k(0); k < mesh.LinesAmountZ; ++k)
179     for (size_t j(0); j < mesh.LinesAmountY; ++j)
180         for (size_t i(0); i < mesh.LinesAmountX; ++i)
181             mesh.points_[k * sxy + j * lx + i] = figure[k][j][i];
182 }
183
184 void MeshGenerator::GenerateListOfAreas(Mesh& mesh) {
185     size_t rx = mesh.LinesAmountX - 1; size_t ry = mesh.LinesAmountY - 1;
186     size_t nx = mesh.LinesAmountX; size_t ny = mesh.LinesAmountY;

```

```

184     size_t rxy = rx * ny + ry * nx; size_t nxy = nx * ny;
185     size_t nz = mesh.LinesAmountZ;
186     for (size_t k(0); k < nz - 1; ++k)
187         for (size_t j(0); j < ny - 1; ++j)
188             for (size_t i(0); i < nx - 1; ++i) {
189                 size_t curr = i + j * (nx + rx) + k * (rxy + nxy);
190                 std::array<size_t, 12> arrI = {
191                     curr, curr + rx, curr + rx + 1, curr + rx + nx,
192                     curr + rxy - j * rx, curr + rxy + 1 - j * rx, curr + rxy + nx - j *
193                     ↪ rx, curr + rxy + nx + 1 - j * rx,
194                     curr + rxy + nxy, curr + rxy + nxy + rx, curr + rxy + nxy + rx + 1,
195                     ↪ curr + rxy + nxy + rx + nx };
196                 int areaNumber = SelectAreaNum(mesh, arrI);
197                 mesh.areasRibs_.emplace_back(areaNumber, arrI); }
198     }
199 void MeshGenerator::GenerateListOfRibs(Mesh& mesh) {
200     auto nx = mesh.LinesAmountX; auto ny = mesh.LinesAmountY;
201     auto nz = mesh.LinesAmountZ;
202     auto nxny = mesh.LinesAmountX * mesh.LinesAmountY;
203     for (int k = 0; k < mesh.LinesAmountZ; k++) {
204         for (int j = 0; j < mesh.LinesAmountY; j++) {
205             for (int i = 0; i < mesh.LinesAmountX - 1; i++)
206                 mesh.referableRibs_.emplace_back(k * nxny + nx * j + i, k * nxny + nx * j
207                 ↪ + i + 1);
208             if (j != mesh.LinesAmountY - 1)
209                 for (int i = 0; i < nx; i++)
210                     mesh.referableRibs_.emplace_back(k * nxny + nx * j + i, k * nxny + nx
211                     ↪ * (j + 1) + i); }
212             if (k != mesh.LinesAmountZ - 1)
213                 for (int j = 0; j < mesh.LinesAmountY; j++)
214                     for (int i = 0; i < mesh.LinesAmountX; i++)
215                         mesh.referableRibs_.emplace_back(k * nxny + nx * j + i, (k + 1) *
216                         ↪ nxny + nx * j + i); }
217         Logger::ConsoleOutput("Ribs array generated.", NotificationColor::Passed);
218     }
219 void MeshGenerator::GenerateListOfBorders(Mesh& mesh) {
220     Logger::ConsoleOutput("Borders generates just for 1st type and formula num 1!",
221     ↪ NotificationColor::Warning);
222     auto nx = mesh.getLinesAmountX(); auto ny = mesh.getLinesAmountY();
223     auto nz = mesh.getLinesAmountZ(); auto nxny = nx * ny;
224     auto rxy = (nx - 1) * ny + (ny - 1) * nx;
225     // XOY
226     for (size_t i = 0; i < ny - 1; i++)
227         for (size_t j = 0; j < nx - 1; j++)
228             mesh.newBorders_.push_back(std::array<size_t, 6> {1, 1,
229             ↪ i * (2 * nx - 1) + j, i * (2 * nx - 1) + j + nx - 1,
230             ↪ i * (2 * nx - 1) + j + nx, i * (2 * nx - 1) + j + nx + nx - 1});
231     // XOZ
232     for (size_t i = 0; i < nz - 1; i++)
233         for (size_t j = 0; j < nx - 1; j++)
234             mesh.newBorders_.push_back(std::array<size_t, 6> {1, 1,
235             ↪ i * (rxy + nxny) + j, i * (rxy + nxny) + j + rxy,
236             ↪ i * (rxy + nxny) + j + rxy + 1, i * (rxy + nxny) + j + rxy + nxny});
237     // OYZ
238     for (size_t i = 0; i < nz - 1; i++)
239         for (size_t j = 0; j < ny - 1; j++)
240             mesh.newBorders_.push_back(std::array<size_t, 6> {1, 1,
241             ↪ nx - 1 + i * (rxy + nxny) + j * (2 * nx - 1), rxy + i * (rxy + nxny) + j
242             ↪ * nx,
243             ↪ rxy + nx + i * (rxy + nxny) + j * nx, rxy + nxny + nx - 1 + i * (rxy +
244             ↪ nxny) + j * (2 * nx - 1)});
245     // XY1
246     for (size_t i = 0; i < ny - 1; i++)
247         for (size_t j = 0; j < nx - 1; j++)
248             mesh.newBorders_.push_back(std::array<size_t, 6> {1, 1,
249             ↪ (nz - 1) * (rxy + nxny) + j + i * (2 * nx - 1),
250             ↪ (nz - 1) * (rxy + nxny) + nx - 1 + j + i * (2 * nx - 1),
251             ↪ (nz - 1) * (rxy + nxny) + nx + j + i * (2 * nx - 1),
252             ↪ (nz - 1) * (rxy + nxny) + nx + nx - 1 + j + i * (2 * nx - 1)});
253     // X1Z
254     for (size_t i = 0; i < nz - 1; i++)
255         for (size_t j = 0; j < nx - 1; j++)
256             mesh.newBorders_.push_back(std::array<size_t, 6> {1, 1,

```

```

251         (ny - 1)* nx + (ny - 1) * (nx - 1) + j + i * (rxy + nxny),
252         (ny - 1)* nx + (ny - 1) * (nx - 1) + nxny - 1 + j + i * (rxy + nxny),
253         (ny - 1)* nx + (ny - 1) * (nx - 1) + nxny + j + i * (rxy + nxny),
254         (ny - 1)* nx + (ny - 1) * (nx - 1) + nxny + j + rxy + i * (rxy + nxny)}});
255 // 1YZ
256 for (size_t i = 0; i < nz - 1; i++)
257     for (size_t j = 0; j < ny - 1; j++)
258         mesh.newBorders_.push_back(std::array<size_t, 6> {1, 1,
259             nx - 1 + i * (rxy + nxny) + j * (2 * nx - 1) + nx - 1,
260             rxy + i * (rxy + nxny) + j * nx + nx - 1,
261             rxy + nx + i * (rxy + nxny) + j * nx + nx - 1,
262             rxy + nxny + nx - 1 + i * (rxy + nxny) + j * (2 * nx - 1) + nx - 1});
263 }

```

## LOS.h

```

1  #pragma once
2
3  #include "Solver.h"
4
5  class LOS : public Solver {
6  public:
7      LOS() : Solver() {};
8      LOS(double eps, size_t maxIters) : Solver(eps, maxIters) {};
9      ~LOS() {};
10     GlobalVector Solve(const GlobalMatrix& A, const GlobalVector& b) const override;
11 };
12

```

## LOS.cpp

```

1  #include "LOS.h"
2
3  GlobalVector LOS::Solve(const GlobalMatrix& A, const GlobalVector& b) const {
4      GlobalVector x(b.Size); GlobalVector _x(b.Size);
5      GlobalVector r(b.Size); GlobalVector _r(b.Size);
6      GlobalVector z(b.Size); GlobalVector _z(b.Size);
7      GlobalVector p(b.Size); GlobalVector _p(b.Size);
8      double alph(0.0); double beta(0.0);
9      r = b - A * x; z = r; p = A * r; size_t iter(0);
10     do {
11         _x = x; _z = z; _r = r; _p = p;
12         alph = (_p * _r) / (_p * _p);
13         x = _x + alph * _z; r = _r - alph * _p;
14         beta = -1.0 * (_p * (A * r)) / (_p * _p);
15         z = r + beta * _z; p = A * r + beta * _p;
16         if (iter % 4 == 0) std::cout << iter << ". " << std::scientific << r.Norma() /
17             << b.Norma() << std::endl;
18         ++iter;
19     } while (iter < _maxIters and r.Norma() / b.Norma() >= _eps);
20     return x;
21 }

```

## Pardiso.cpp

```

1  #include "stdafx.h"
2
3  ofstream logfile;
4
5  int Write_Txt_File_Of_Double(const char *fname, double *massiv, int n_of_records, int
6      ↪ len_of_record) {
7      FILE *fp;
8      int i, j;
9      if ((fp = fopen(fname, "w")) == 0) {
10         printf("Error: Cannot open file \"%s\" for writing.\n", fname);
11         return 1; }

```

```

11     printf("writing %s... ", fname);
12     for (i = 0; i < n_of_records; i++) {
13         for (j = 0; j < len_of_record; j++)
14             fprintf(fp, "%25.13e\t", massiv[i*len_of_record + j]);
15         fprintf(fp, "\n");
16     }
17     printf("done\n");
18     fclose(fp);
19     return 0;
20 }
21
22 int Read_Long_From_Txt_File(const char *fname, int *number) {
23     FILE *fp;
24     int temp; int retcode;
25     if ((fp = fopen(fname, "r")) == 0) {
26         char str[100];
27         sprintf(str, "Error: Cannot open file \"%s\" for reading.\n", fname);
28         return 1; } retcode = fscanf(fp, "%ld", &temp);
29     if (retcode != 1){
30         char str[100];
31         sprintf(str, "Error reading file \"%s\".\n", fname);
32         fclose(fp); } *number = temp;
33     fclose(fp); return 0;
34 }
35
36 int Read_Bin_File_Of_Double(const char *fname, double *massiv, int n_of_records, int
    ↪ len_of_record) {
37     int temp; FILE *fp;
38     if ((fp = fopen(fname, "r+b")) == 0) {
39         char str[100];
40         sprintf(str, "Error: Cannot open file \"%s\" for reading.\n", fname);
41         return 1; }
42     temp = fread(massiv, sizeof(double)*len_of_record, n_of_records, fp);
43     if (temp != n_of_records) {
44         char str[100];
45         sprintf(str, "Error reading file \"%s\". %ld of %ld records was read.\n", fname,
    ↪ temp, n_of_records);
46         fclose(fp);
47         return 1; }
48     fclose(fp); return 0;
49 }
50
51 int Read_Bin_File_Of_Long(const char *fname, int *massiv, int n_of_records, int
    ↪ len_of_record) {
52     int temp; FILE *fp;
53     if ((fp = fopen(fname, "r+b")) == 0) {
54         char str[100];
55         sprintf(str, "Cannot open file %s.\n", fname);
56         return 1; }
57     temp = fread(massiv, sizeof(int)*len_of_record, n_of_records, fp);
58     if (temp != n_of_records){
59         char str[100];
60         sprintf(str, "Error reading file \"%s\". %ld of %ld records was read.\n", fname,
    ↪ temp, n_of_records);
61         fclose(fp);
62         return 1; }
63     fclose(fp); return 0;
64 }
65
66 void FromRSFToCSR_Real_1_Sym(int nb, int *ig, int *sz_ia, int *sz_ja) {
67     *sz_ia = nb + 1; *sz_ja = ig[nb] + nb;
68 }
69
70 void FromRSFToCSR_Real_2_Sym(int nb, int *ig, int *jg, double *di, double *gg,
    MKL_INT *ia, MKL_INT *ja, double *a) {
71     int i, j, k;
72     vector<MKL_INT> adr;
73     adr.resize(nb, 0);
74     for (i = 0; i < nb; i++) {
75         adr[i] += 1;
76         for (j = ig[i]; j <= ig[i + 1] - 1; j++) {
77             k = jg[j];
78             adr[k]++; }
79     // ia
80     ia[0] = 0;
81     for (i = 0; i < nb; i++) ia[i + 1] = ia[i] + adr[i];

```

```

82
83 // ja, a
84 for (i = 0; i<ig[nb] + nb; i++) a[i] = 0;
85
86 for (i = 0; i<nb; i++) adr[i] = ia[i];
87
88 for (i = 0; i<nb; i++) {
89     ja[adr[i]] = i;
90     a[adr[i]] = di[i];
91     adr[i]++; }
92 for (i = 0; i<nb; i++) {
93     for (j = ig[i]; j <= ig[i + 1] - 1; j++) {
94         k = jg[j]; ja[adr[k]] = i;
95         a[adr[k]] = gg[j]; adr[k]++; } }
96 }
97
98
99 int _tmain(int argc, _TCHAR* argv[]) {
100     logfile.open("pardiso64.log");
101     if (!logfile) {
102         cerr << "Cannot open pardiso64.log" << endl;
103         return 1; }
104     int i; int ig_n_1 = 0;
105     int sz_ia = 0; int sz_ja = 0;
106     int nb; int *ig = NULL;
107     int *jg = NULL; double *di = NULL;
108     double *ggl = NULL;
109     clock_t begin = clock();
110     MKL_INT pt[64]; for (int i(0); i < 64; ++i) pt[i] = 0;
111     MKL_INT maxfct = 1; MKL_INT mnum = 1;
112     MKL_INT mtype = 2; MKL_INT phase = 13;
113     MKL_INT n = 0;
114     double *a = NULL; MKL_INT *ia = NULL;
115     MKL_INT *ja = NULL; MKL_INT *perm = NULL;
116     MKL_INT nrhs = 1; MKL_INT iparm[64];
117     iparm[0] = 1; for (i = 1; i < 64; i++) iparm[i] = 0;
118     iparm[0] = 1; MKL_INT msglvl = 1; double *pr = NULL;
119     double *x = NULL; MKL_INT error = 0;
120     Read_Long_From_Txt_File("kuslau2", &nb);
121     ig = new int[nb + 1];
122     Read_Bin_File_Of_Long("ig", ig, nb + 1, 1);
123     for (i = 0; i<nb + 1; i++) ig[i]--;
124     ig_n_1 = ig[nb];
125     jg = new int[ig_n_1];
126     Read_Bin_File_Of_Long("jg", jg, ig_n_1, 1);
127     for (i = 0; i<ig_n_1; i++) jg[i]--;
128     di = new double[nb];
129     Read_Bin_File_Of_Double("di", di, nb, 1);
130     ggl = new double[ig_n_1];
131     Read_Bin_File_Of_Double("gg", ggl, ig_n_1, 1);
132     pr = new double[nb];
133     Read_Bin_File_Of_Double("pr", pr, nb, 1);
134     FromRSFTtoCSR_Real_1_Sym(nb, ig, &sz_ia, &sz_ja);
135     ia = new MKL_INT[sz_ia]; ja = new MKL_INT[sz_ja];
136     a = new double[sz_ja];
137     FromRSFTtoCSR_Real_2_Sym(nb, ig, jg, di, ggl, ia, ja, a);
138     for (i = 0; i<sz_ia; i++) ia[i]++;
139     for (i = 0; i<sz_ja; i++) ja[i]++;
140     if (ig) { delete[] ig; ig = NULL; }
141     if (jg) { delete[] jg; jg = NULL; }
142     if (di) { delete[] di; di = NULL; }
143     if (ggl) { delete[] ggl; ggl = NULL; }
144     n = nb; x = new double[nb];
145     perm = new MKL_INT[nb];
146     cout << "pardiso start.." << endl << flush;
147     PARDISO(pt, &maxfct, &mnum, &mtype, &phase,
148         &n, a, ia, ja, perm, &nrhs, iparm,
149         &msglvl, pr, x, &error); phase = -1;
150     PARDISO(pt, &maxfct, &mnum, &mtype, &phase,
151         &n, a, ia, ja, perm, &nrhs, iparm,
152         &msglvl, pr, x, &error);
153     clock_t time = (clock() - begin) / CLOCKS_PER_SEC;
154     ofstream fout; fout.open("kit", ios_base::app);
155     fout << "n=" << nb << " pardiso time=" << time << " s" << endl;
156     fout.close();
157     Write_Txt_File_Of_Double("x.txt", x, nb, 1);

```

```

158 | cout << "info=" << error << endl;
159 | logfile << "info=" << error << endl;
160 | if (a) { delete[] a; a = NULL; }
161 | if (x) { delete[] x; x = NULL; }
162 | if (pr) { delete[] pr; pr = NULL; }
163 | if (ia) { delete[] ia; ia = NULL; }
164 | if (ja) { delete[] ja; ja = NULL; }
165 | if (perm) { delete[] perm; perm = NULL; }
166 | logfile.close(); logfile.clear();
167 | return 0;
168 | }

```