

Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

Физико-механический институт

Высшая школа теоретической механики и математической физики

Лабораторная работа №4

Решение плоской задачи теории упругости

по дисциплине «Вычислительная механика»

Выполнил
Студент гр. 5030103/10301

А.Г. Фёдоров

Преподаватель

Е.Ю. Витохин

Санкт-Петербург

2024

Содержание

Постановка задачи	3
Выполнение задания.....	4
1. Метод решения	4
2. Результаты.....	8
2.1. Напряжения.....	8
2.2. Деформации.....	10
2.2. Перемещения.....	12

Постановка задачи

Требуется найти узловые перемещения, деформации и напряжения в элементах, считая, что дно основания закреплено по оси Y , а боковые стороны основания закреплены по X . На элементы, соприкасающиеся с жидкостью, действует давление. На все элементы кроме основания действует сила тяжести.

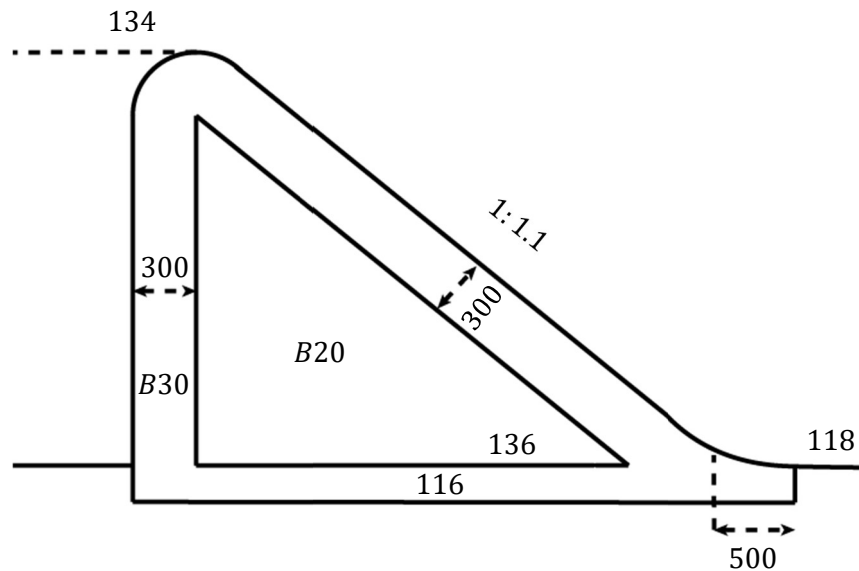


Рис.1 Схема плотины

Материал – бетон двух типов.

B20: $E = 2.75 \cdot 10^{10}$ Па, $\nu = 0.14$, $\rho = 2500 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$

B30: $E = 3.25 \cdot 10^{10}$ Па, $\nu = 0.14$, $\rho = 2500 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$

Скальное основание: $E = 2.3 \cdot 10^{10}$ Па, $\nu = 0.25$, $\rho = 2950 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$

Выполнение задания

1. Метод решения

Рассмотрим задачу деформирования изотропного упругого твердого тела под действием статических нагрузок в плоской постановке. Расчетную область разделим на треугольные линейные элементы. Перемещения в таком элементе аппроксимируются полиномом первого порядка:

$$U = A + Bx + Cy. \quad (1)$$

Вектор-столбец узловых перемещений состоит из шести степеней свободы:

$$\{u^e\}^T = \{u_i^x \ u_i^y \ u_j^x \ u_j^y \ u_k^x \ u_k^y\}. \quad (2)$$

Узловые перемещения связаны с проекциями непрерывных перемещений на оси системы координат так:

$$\begin{aligned} u_x &= u_i^x N_i^x + u_j^x N_j^x + u_k^x N_k^x \\ u_y &= u_i^y N_i^y + u_j^y N_j^y + u_k^y N_k^y. \end{aligned} \quad (3)$$

В матричном виде (3) можно записать следующим образом:

$$U = \begin{Bmatrix} u_x \\ u_y \end{Bmatrix} = [N]\{u^e\}, \quad (4)$$

где матрица с функциями форм $[N]$ имеет следующий вид:

$$[N] = \begin{bmatrix} N_i^x & 0 & N_j^x & 0 & N_k^x & 0 \\ 0 & N_i^y & 0 & N_j^y & 0 & N_k^y \end{bmatrix}.$$

Отметим, что функции форм вдоль оси x и y совпадают, тогда можно избавиться от этого разделения:

$$[N] = \begin{bmatrix} N_i & 0 & N_j & 0 & N_k & 0 \\ 0 & N_i & 0 & N_j & 0 & N_k \end{bmatrix}. \quad (5)$$

Для нахождения перемещений, отвечающих внешним воздействиям, будем использовать вариационный принцип: определим функционал потенциальной энергии и найдем его минимум. Функционал потенциальной энергии состоит из энергии внутренних сил и работы внешних сил:

$$\Pi = \Lambda - \Omega. \quad (6)$$

Потенциальная энергия бесконечно малого объема dV равна разности энергий этого объема:

$$d\Pi = d\Lambda - d\Omega. \quad (7)$$

Энергия внутренних сил бесконечно малого объема равна произведению деформации на напряжения этого объема:

$$d\Lambda = \frac{1}{2} \{\varepsilon\}^T \{\sigma\} dV. \quad (8)$$

Для того, чтобы найти энергию конечного объема, необходимо проинтегрировать выражение (8):

$$\Lambda = \frac{1}{2} \int_V \{\varepsilon\}^T \{\sigma\} dV. \quad (9)$$

Вектор-столбец с деформациями в плоском случае состоит из трех компонент:

$$\{\varepsilon\}^T = \{\varepsilon_x \quad \varepsilon_y \quad 2\varepsilon_{xy}\}. \quad (10)$$

Поставленную задачу будем рассматривать в малых деформациях. В таком случае деформации связаны с перемещениями так:

$$\varepsilon_x = \frac{\partial u_x}{\partial x}, \quad \varepsilon_y = \frac{\partial u_y}{\partial y}, \quad 2\varepsilon_{xy} = \frac{\partial u_x}{\partial y} + \frac{\partial u_y}{\partial x}. \quad (11)$$

Перейдем от непрерывных перемещений (11) к узловым с помощью выражения (4). Тогда вектор-столбец деформаций примет вид

$$\{\varepsilon\} = \begin{Bmatrix} \frac{\partial N_i}{\partial x} u_i^x + \frac{\partial N_j}{\partial x} u_j^x + \frac{\partial N_k}{\partial x} u_k^x \\ \frac{\partial N_i}{\partial y} u_i^y + \frac{\partial N_j}{\partial y} u_j^y + \frac{\partial N_k}{\partial y} u_k^y \\ \frac{\partial N_i}{\partial y} u_i^x + \frac{\partial N_i}{\partial x} u_i^y + \frac{\partial N_j}{\partial y} u_j^x + \frac{\partial N_j}{\partial x} u_j^y + \frac{\partial N_k}{\partial y} u_k^x + \frac{\partial N_k}{\partial x} u_k^y \end{Bmatrix}. \quad (12)$$

После вынесения узловых перемещений из (12) выражение можно записать в компактной матричной форме:

$$\{\varepsilon\} = [B] \{u^e\}, \quad (13)$$

где матрица градиентов $[B]$ выглядит так:

$$[B] = \begin{bmatrix} \frac{\partial N_i}{\partial x} & 0 & \frac{\partial N_j}{\partial x} & 0 & \frac{\partial N_k}{\partial x} & 0 \\ 0 & \frac{\partial N_i}{\partial y} & 0 & \frac{\partial N_j}{\partial y} & 0 & \frac{\partial N_k}{\partial y} \\ \frac{\partial N_i}{\partial y} & \frac{\partial N_i}{\partial x} & \frac{\partial N_j}{\partial y} & \frac{\partial N_j}{\partial x} & \frac{\partial N_k}{\partial y} & \frac{\partial N_k}{\partial x} \end{bmatrix}. \quad (14)$$

Для вычисления матрицы градиентов (14) можно воспользоваться функциями форм изопараметрического элемента.

Физические соотношения для линейно-упругого тела в случае плосконапряженного состояния имеют вид

$$\begin{aligned}\sigma_x &= \frac{E}{1-\nu^2}(\varepsilon_x + \nu\varepsilon_y) \\ \sigma_y &= \frac{E}{1-\nu^2}(\nu\varepsilon_x + \varepsilon_y) \\ \sigma_{xy} &= \frac{E}{2(1+\nu)}\varepsilon_{xy},\end{aligned}\tag{15}$$

где E – модуль Юнга, ν - коэффициент Пуассона.

В матричном виде (15) с учетом геометрических соотношений можно записать так:

$$\{\sigma\} = [D]\{\varepsilon\} = [D][B]\{u^e\},\tag{16}$$

где матрица $[D]$ называется матрицей упругих характеристик, которая определяется следующим выражением:

$$[D] = \frac{E(1-\nu)}{(1+\nu)(1-2\nu)} \begin{bmatrix} 1 & \frac{\nu}{1-\nu} & 0 \\ \frac{\nu}{1-\nu} & 1 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1-\nu}{2(1-\nu)} \end{bmatrix}.\tag{17}$$

Подставим геометрические (13) и физические (16) соотношения в выражение для внутренней энергии (9):

$$\Lambda = \frac{1}{2} \int_V \{u^e\}^T [B]^T [D] [B] dV \{u^e\}.\tag{18}$$

Работа внешних сил складывается из работы сосредоточенных, поверхностных и объемных сил:

$$\Omega = \Omega_c + \Omega_l + \Omega_V.\tag{19}$$

Минимизируем функционал потенциальной энергии:

$$\frac{\delta \Pi}{\delta \{u^e\}} = 0\tag{20}$$

$$\int_V [B]^T [D] [B] \{u\} dV = \{f^e\},\tag{21}$$

где $\{f^e\}$ – вектор-столбец узловых усилий.

Множитель при узловых перемещениях в левой части (21) назовем матрицей жесткости элемента:

$$[k^e] = \int_V [B]^T [D] [B] dV.\tag{22}$$

С учетом обозначения (22) уравнение (21) примет вид

$$[k^e]\{u^e\} = \{f^e\}. \quad (23)$$

Чтобы решить задачу с расчетной областью, разделенной на множество конечных элементов, необходимо построить глобальную матрицу жесткости и нагрузок, которые находятся в результате суммирования локальных матриц, приведенных к глобальному виду. После такого суммирования получим основное уравнение МКЭ для системы конечных элементов:

$$[K]\{U\} = [F]. \quad (24)$$

2. Результаты

2.1. Напряжения

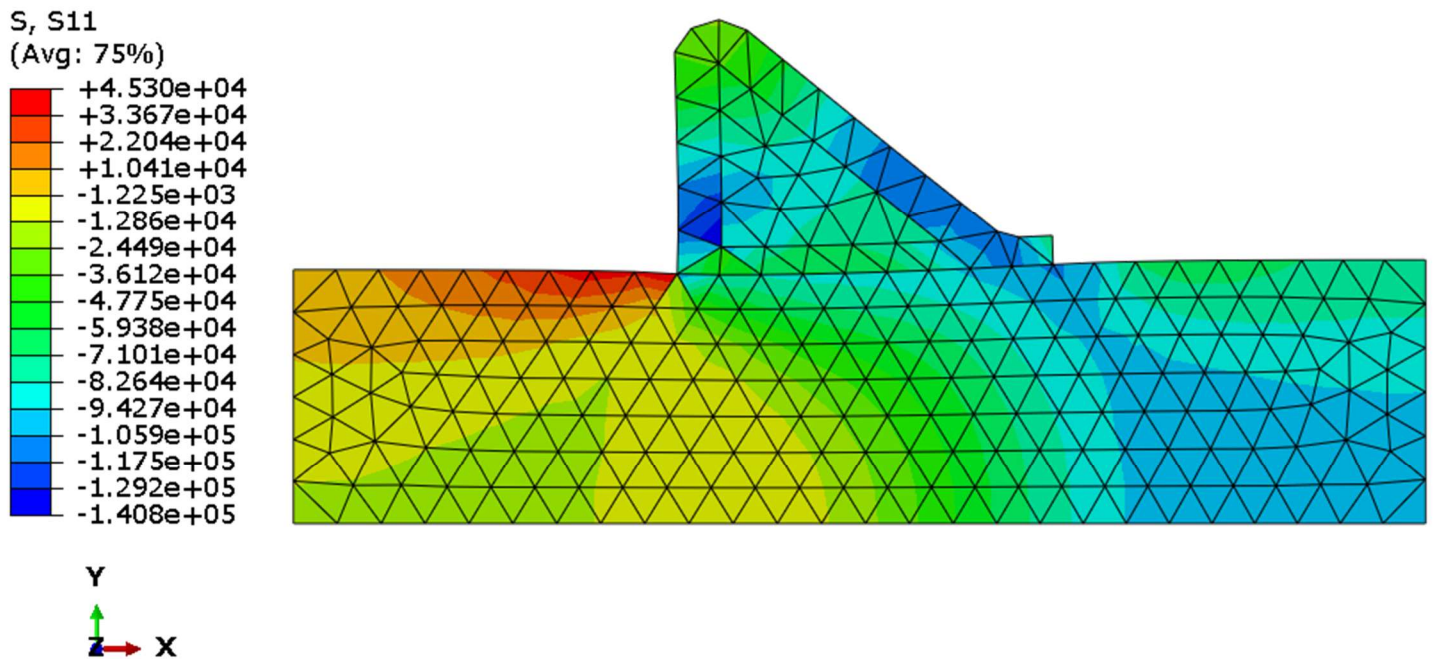


Рис.2 Напряжения по x Abaqus, Па

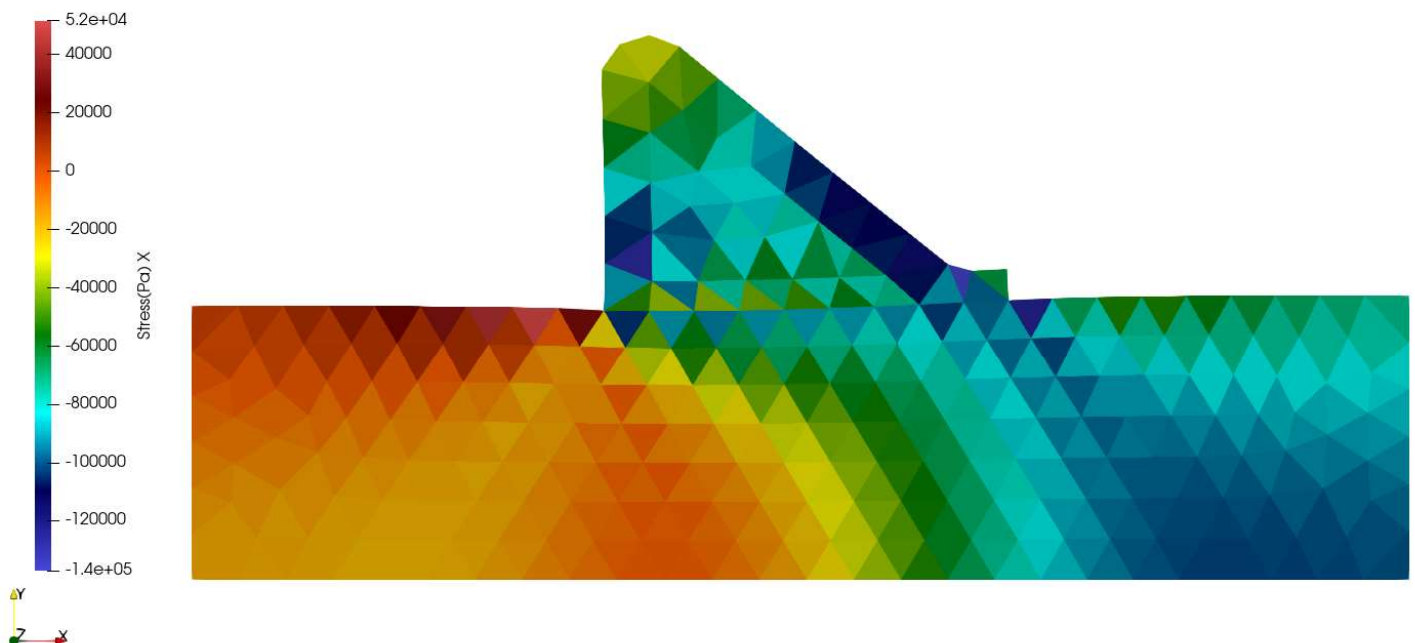


Рис.3 Напряжения по x Python, Па

S, S22
(Avg: 75%)

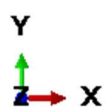
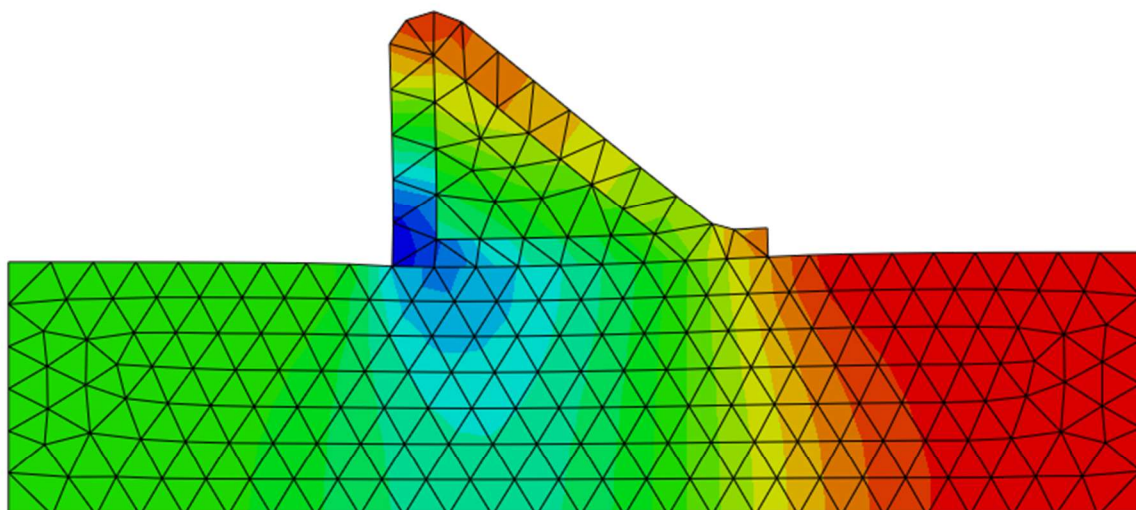
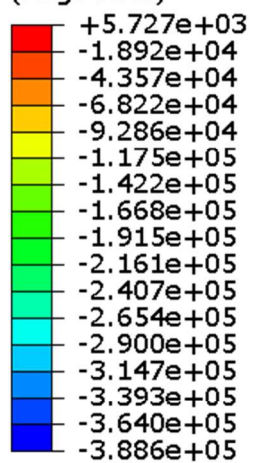


Рис.4 Напряжения по y Abaqus, Па

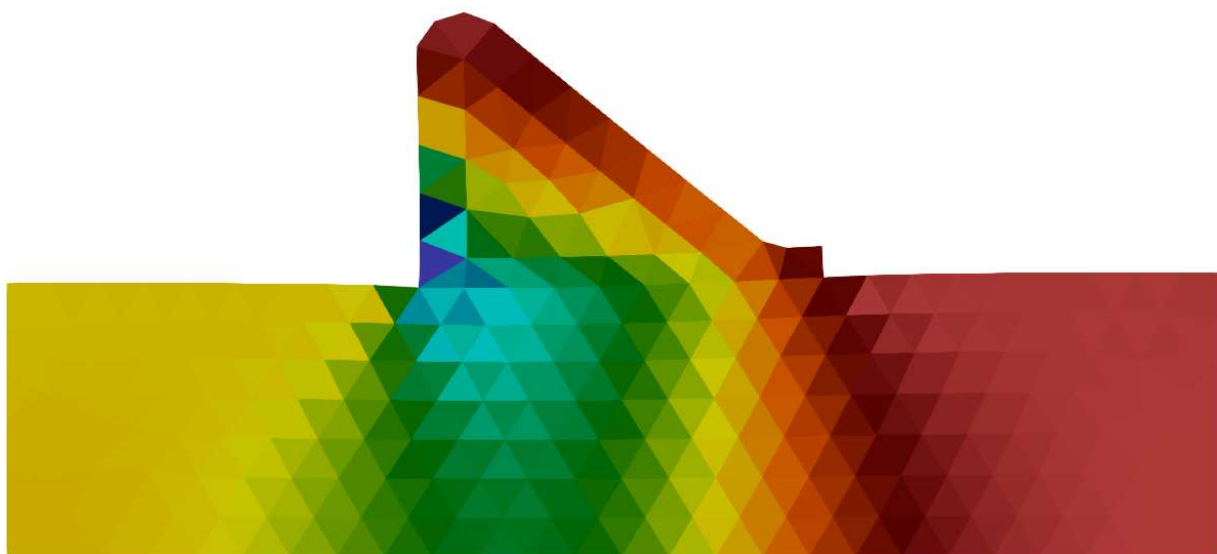
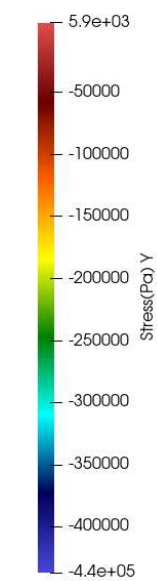


Рис.5 Напряжения по y Python, Па

2.2. Деформации

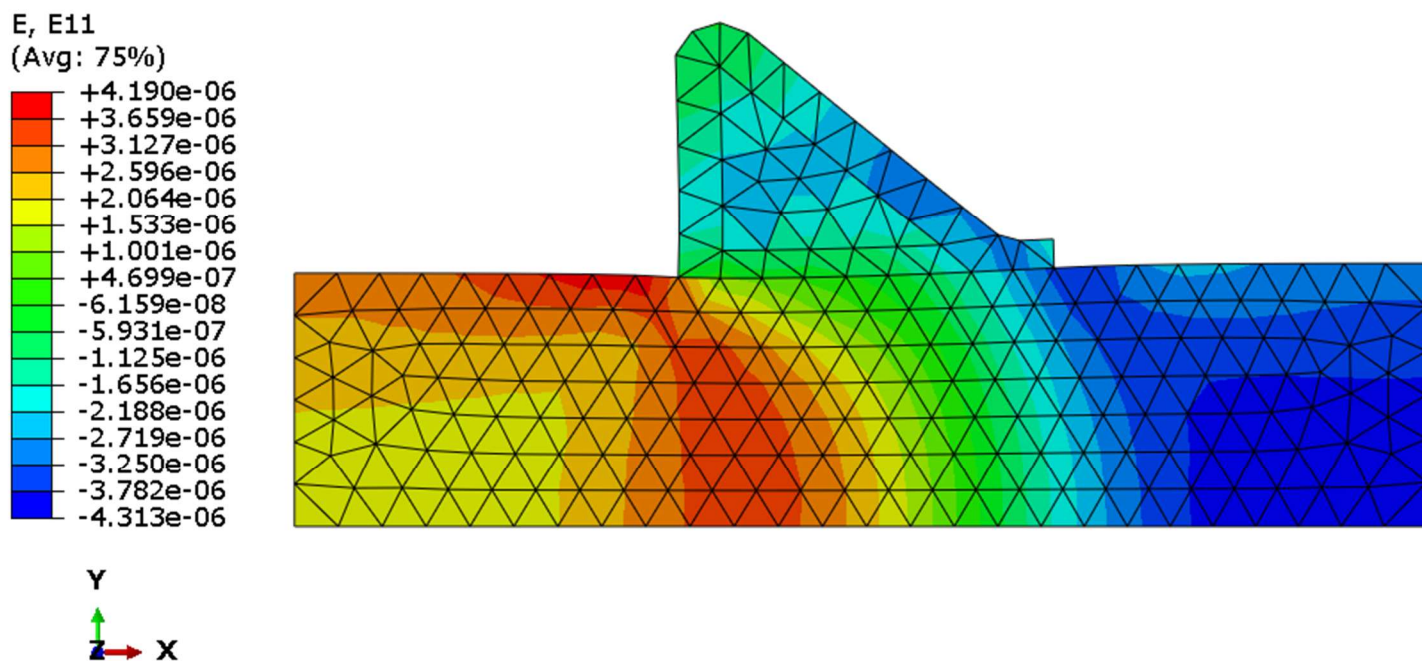


Рис.6 Деформации по x Abaqus, м

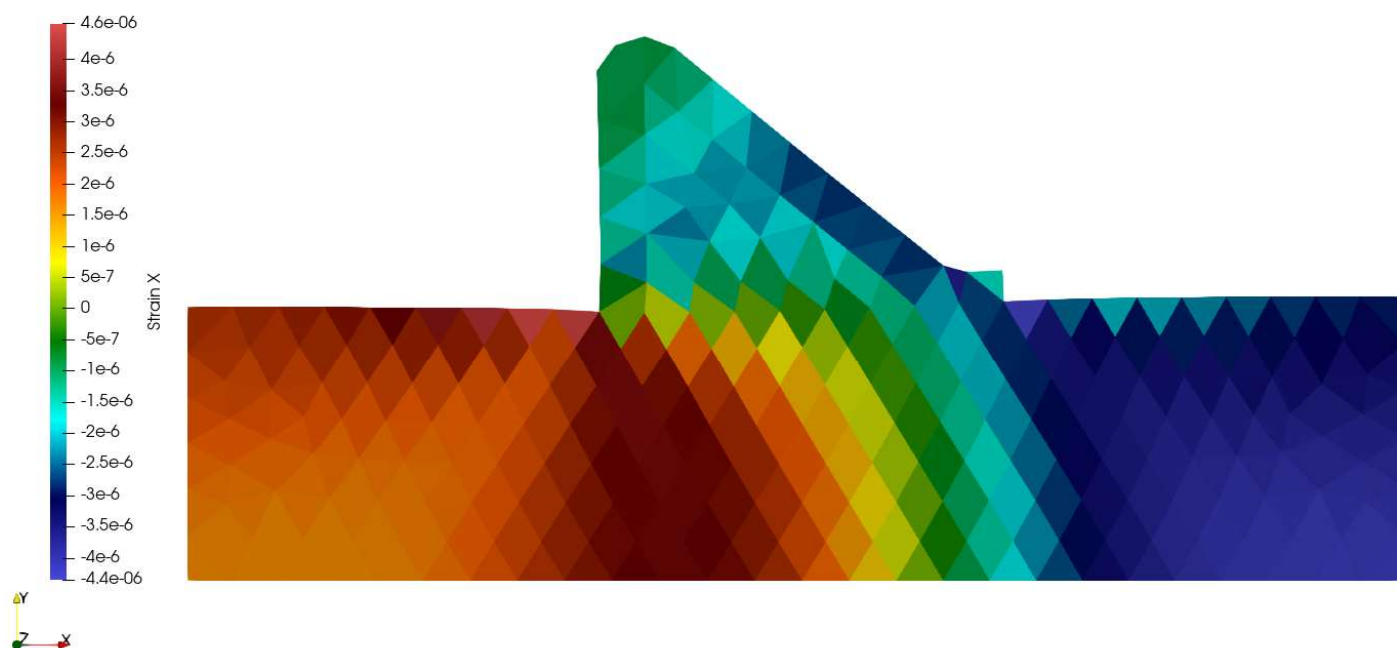


Рис.7 Деформации по x Python, м

E, E22
(Avg: 75%)

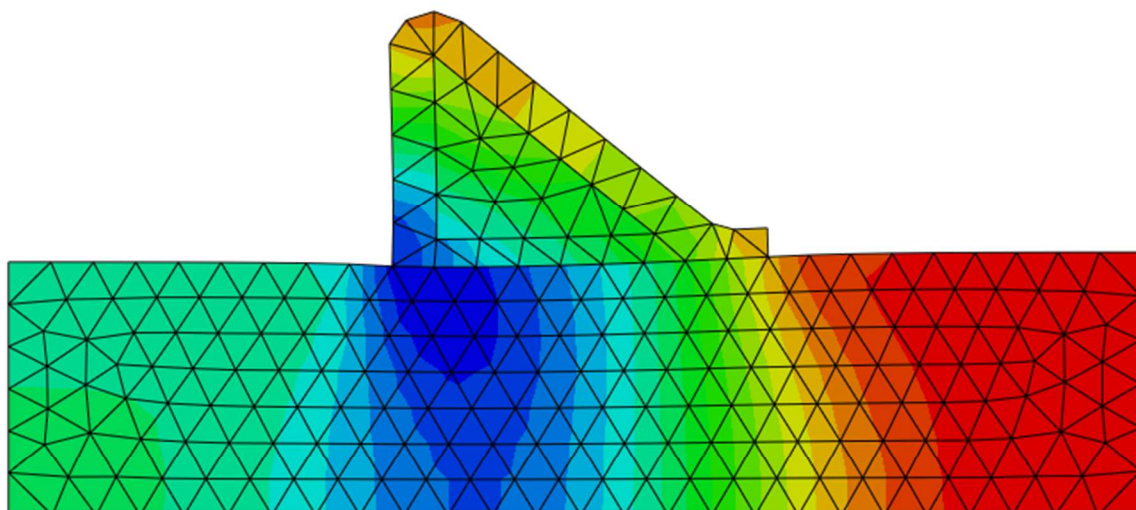
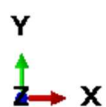
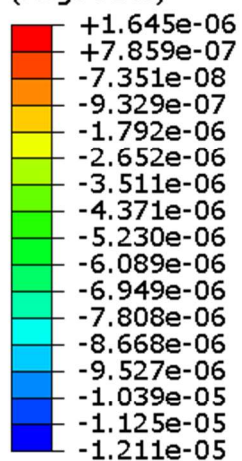
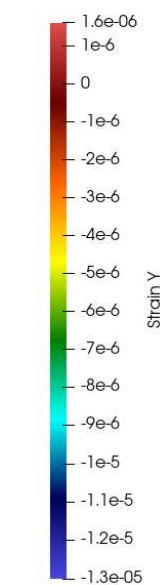


Рис.8 Деформации по у Abaqus, м



Strain Y

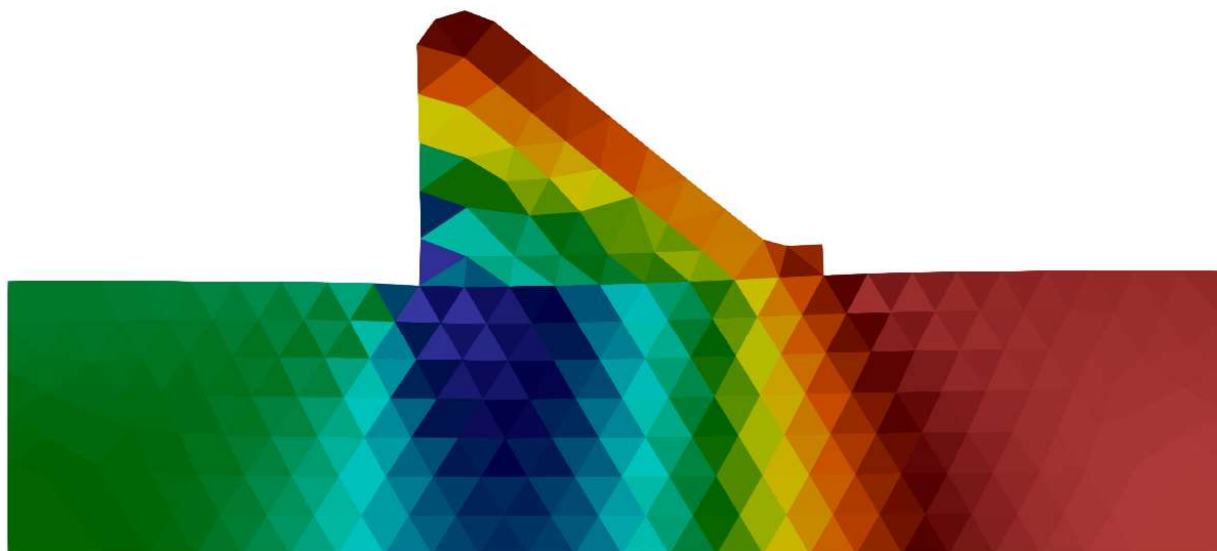


Рис.9 Деформации по у Python, м

2.2. Перемещения

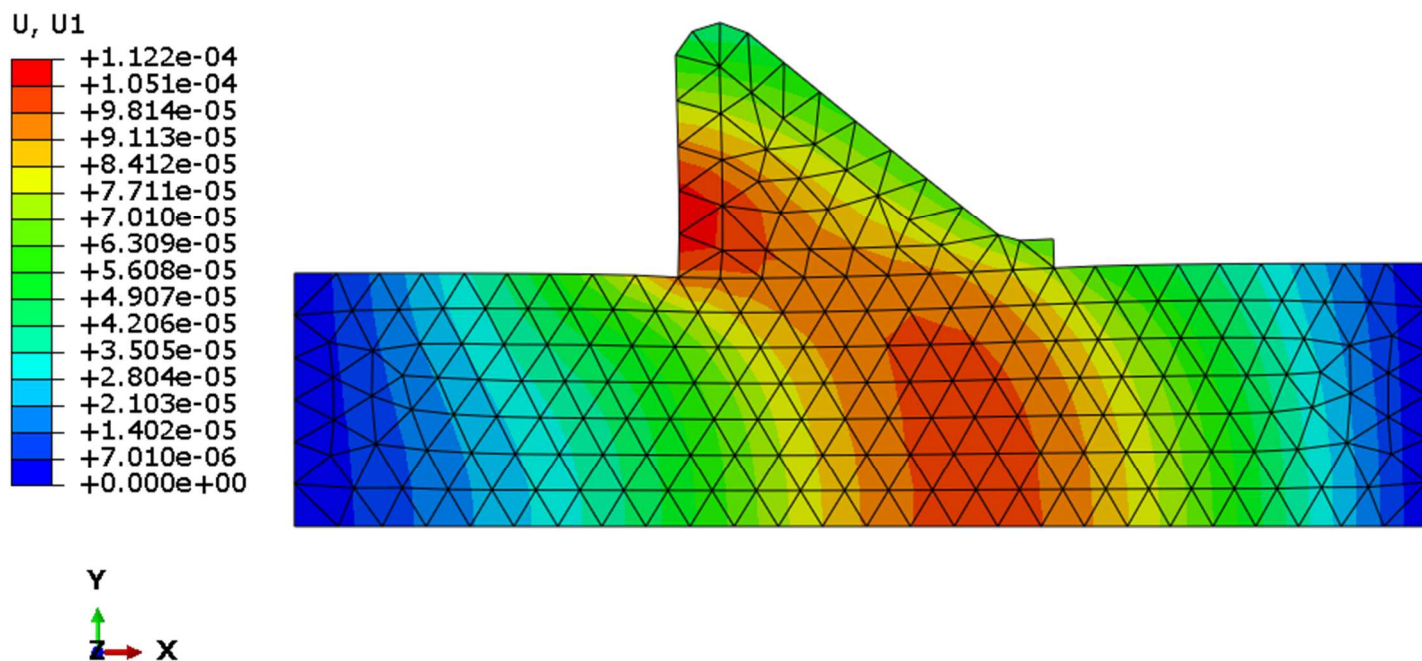


Рис.10 Перемещения по x Abaqus, м

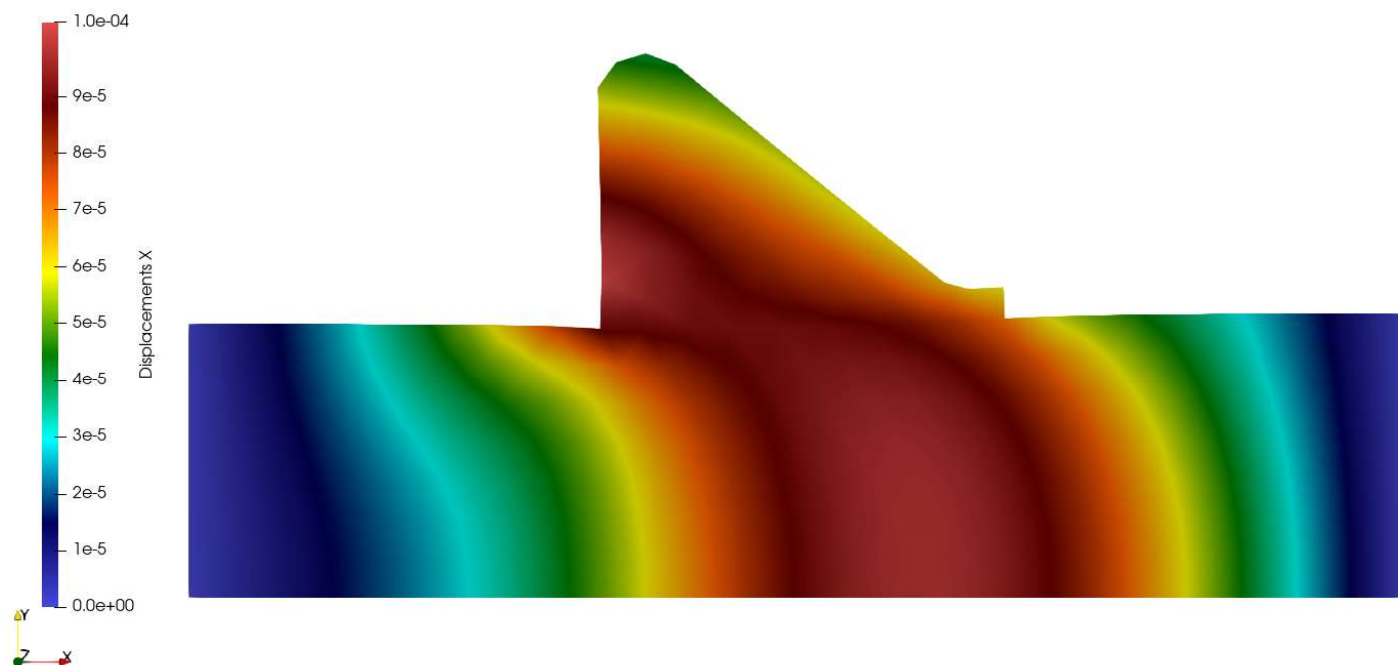


Рис.11 Перемещения по x Python, м

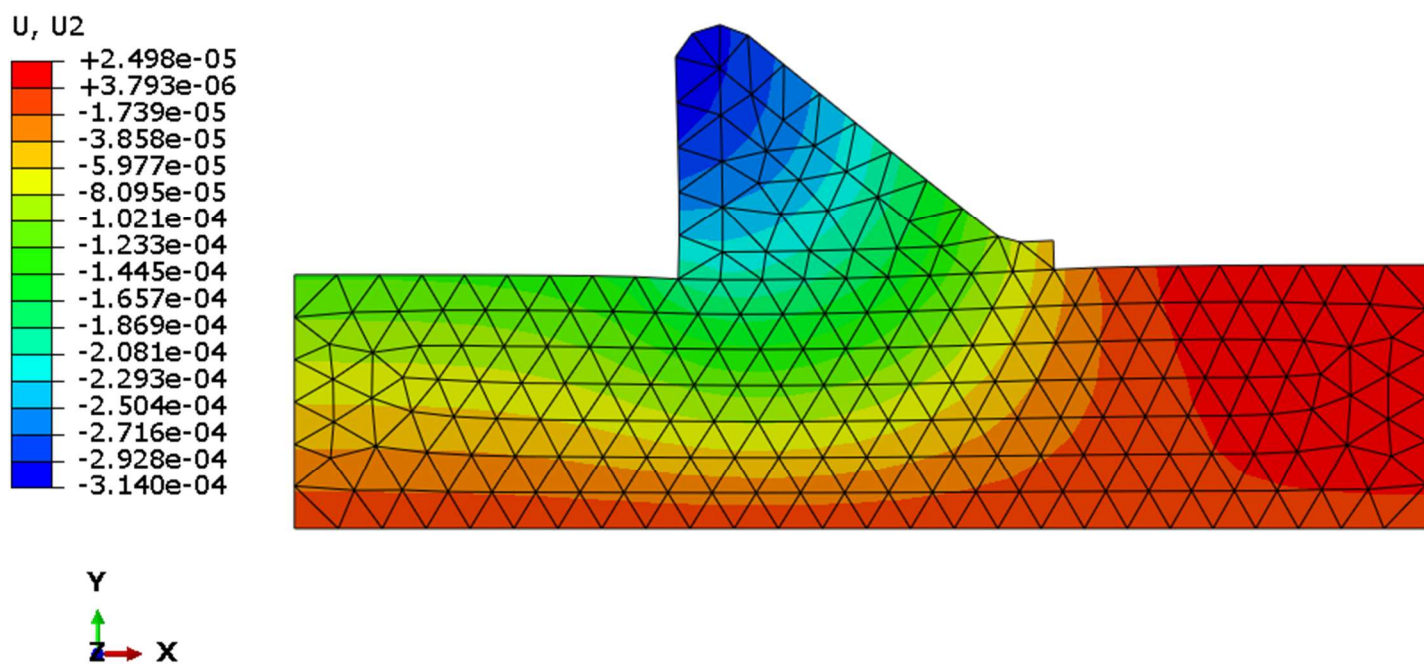


Рис.12 Перемещения по y Abaqus, м

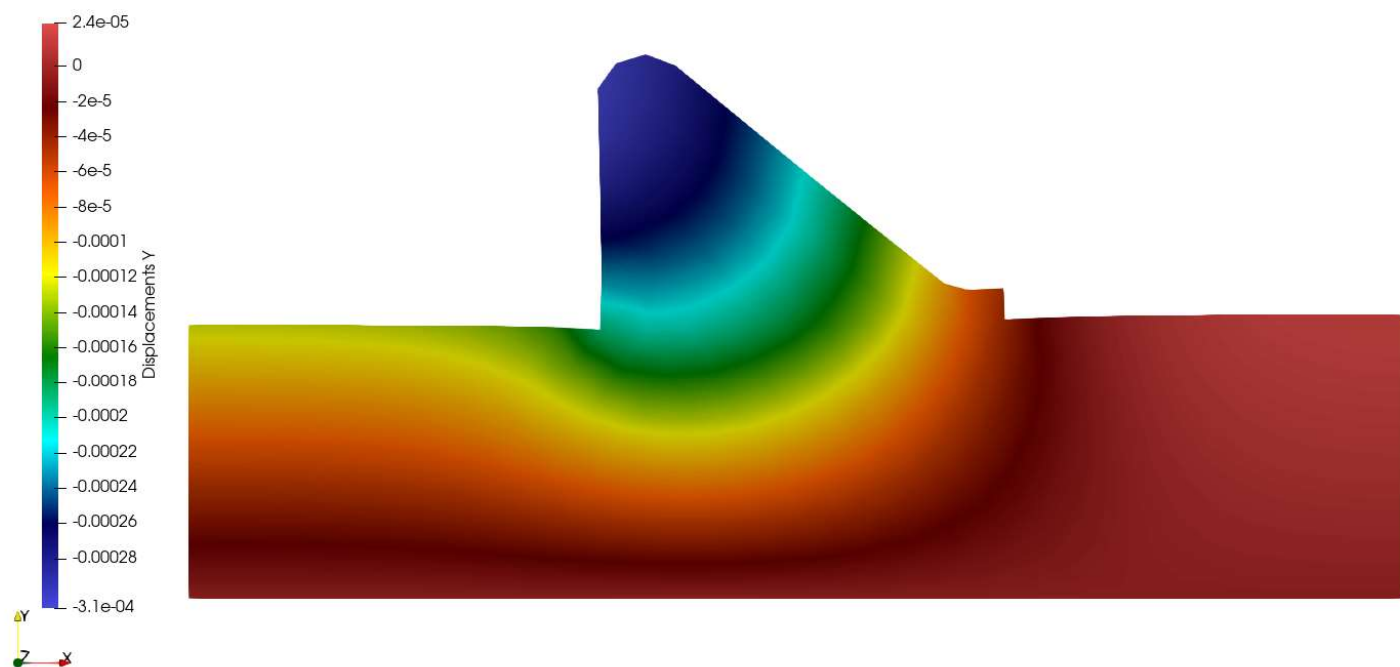


Рис.13 Перемещения по y Python, м

Табл.1 Перемещения по x

Перемещения по X , м							
№	Python	Abaqus	Разница	№	Python	Abaqus	Разница
1	0	-2,068E-32	2,06842E-32	128	6,556E-05	6,822E-05	2,66E-06
2	0	1,559E-31	1,5587E-31	129	5,642E-05	5,866E-05	2,24E-06
3	0	1,127E-31	1,12664E-31	130	4,787E-05	4,972E-05	1,85E-06
4	7,081E-05	7,45E-05	3,69618E-06	131	3,948E-05	4,097E-05	1,49E-06
5	8,938E-05	9,587E-05	6,49257E-06	132	3,102E-05	3,217E-05	1,15E-06
6	0	1,276E-32	1,27615E-32	133	2,212E-05	2,292E-05	8,02E-07
7	5,38E-05	5,586E-05	2,0633E-06	134	1,232E-05	1,276E-05	4,43E-07
8	5,857E-05	6,274E-05	4,16169E-06	135	7,38E-05	7,866E-05	4,86E-06
9	6,229E-05	6,663E-05	4,3377E-06	136	8,126E-05	8,638E-05	5,11E-06
10	6,427E-05	6,893E-05	4,66502E-06	137	8,669E-05	9,183E-05	5,14E-06
11	4,272E-05	4,454E-05	1,81809E-06	138	9,036E-05	9,535E-05	4,99E-06
12	4,073E-05	4,107E-05	3,406E-07	139	9,264E-05	9,739E-05	4,74E-06
13	5,519E-05	5,891E-05	3,71967E-06	140	9,347E-05	9,792E-05	4,45E-06
14	7,787E-05	8,292E-05	5,0482E-06	141	9,262E-05	9,677E-05	4,15E-06
15	9,612E-05	0,0001037	7,58567E-06	142	8,961E-05	9,345E-05	3,84E-06
16	4,805E-06	5,178E-06	3,72724E-07	143	9,731E-06	1,029E-05	5,62E-07
17	9,574E-06	1,031E-05	7,36116E-07	144	1,764E-05	1,866E-05	1,02E-06
18	1,431E-05	1,539E-05	1,07783E-06	145	2,553E-05	2,701E-05	1,49E-06
19	1,908E-05	2,047E-05	1,3868E-06	146	3,34E-05	3,537E-05	1,97E-06
20	2,406E-05	2,571E-05	1,65379E-06	147	4,148E-05	4,397E-05	2,49E-06
21	2,954E-05	3,142E-05	1,87366E-06	148	4,963E-05	5,272E-05	3,08E-06
22	3,592E-05	3,797E-05	2,0502E-06	149	5,739E-05	6,113E-05	3,74E-06
23	4,351E-05	4,57E-05	2,1958E-06	150	4,989E-06	5,347E-06	3,58E-07
24	5,235E-05	5,468E-05	2,32549E-06	151	5,478E-06	5,845E-06	3,67E-07
25	6,212E-05	6,457E-05	2,44802E-06	152	9,204E-05	9,537E-05	3,33E-06
26	7,214E-05	7,47E-05	2,56057E-06	153	8,599E-05	8,904E-05	3,05E-06
27	8,154E-05	8,419E-05	2,65051E-06	154	6,931E-05	7,333E-05	4,02E-06
28	8,947E-05	9,217E-05	2,70402E-06	155	5,924E-05	6,296E-05	3,72E-06
29	9,525E-05	9,796E-05	2,71406E-06	156	9,592E-05	9,975E-05	3,83E-06
30	9,84E-05	0,0001011	2,68012E-06	157	1,96E-05	2,083E-05	1,23E-06
31	9,864E-05	0,0001012	2,60603E-06	158	6,781E-05	7,02E-05	2,39E-06
32	9,592E-05	9,842E-05	2,49364E-06	159	5,784E-05	5,986E-05	2,03E-06
33	9,041E-05	9,275E-05	2,3424E-06	160	4,801E-05	4,969E-05	1,67E-06
34	8,249E-05	8,464E-05	2,15099E-06	161	7,816E-05	8,238E-05	4,22E-06
35	7,269E-05	7,461E-05	1,91937E-06	162	8,534E-05	8,961E-05	4,27E-06
36	6,16E-05	6,325E-05	1,65095E-06	163	9,071E-05	9,491E-05	4,2E-06
37	4,972E-05	5,107E-05	1,35239E-06	164	9,429E-05	9,833E-05	4,03E-06
38	3,744E-05	3,847E-05	1,03132E-06	165	2,624E-05	2,79E-05	1,66E-06
39	2,499E-05	2,569E-05	6,95014E-07	166	4,563E-05	4,867E-05	3,03E-06
40	1,249E-05	1,284E-05	3,49386E-07	167	3,939E-05	4,196E-05	2,57E-06
41	0	3,08E-31	3,08045E-31	168	3,278E-05	3,489E-05	2,11E-06
42	0	2,98E-31	2,97993E-31	169	9,532E-05	9,891E-05	3,59E-06
43	0	2,826E-31	2,82647E-31	170	5,143E-05	5,487E-05	3,43E-06
44	0	2,638E-31	2,6378E-31	171	2,892E-05	2,991E-05	9,92E-07

45	0	2,437E-31	2,43665E-31	172	3,829E-05	3,962E-05	1,32E-06
46	8,476E-06	8,788E-06	3,11861E-07	173	7,762E-05	8,037E-05	2,74E-06
47	1,673E-05	1,736E-05	6,23441E-07	174	7,131E-05	7,328E-05	1,97E-06
48	2,463E-05	2,557E-05	9,3845E-07	175	4,865E-05	5,003E-05	1,38E-06
49	3,199E-05	3,325E-05	1,26024E-06	176	3,647E-05	3,751E-05	1,05E-06
50	3,874E-05	4,034E-05	1,59635E-06	177	1,555E-05	1,668E-05	1,14E-06
51	4,496E-05	4,692E-05	1,96035E-06	178	9,745E-06	1,047E-05	7,2E-07
52	5,104E-05	5,342E-05	2,37899E-06	179	2,061E-05	2,208E-05	1,48E-06
53	5,831E-05	6,122E-05	2,91039E-06	180	9,53E-05	9,79E-05	2,6E-06
54	7,857E-05	8,27E-05	4,13174E-06	181	8,947E-05	9,19E-05	2,43E-06
55	8,494E-05	8,943E-05	4,4875E-06	182	5,35E-05	5,603E-05	2,53E-06
56	8,852E-05	9,336E-05	4,83904E-06	183	4,468E-05	4,706E-05	2,38E-06
57	9,052E-05	9,573E-05	5,21358E-06	184	6,34E-05	6,607E-05	2,67E-06
58	9,138E-05	9,699E-05	5,60941E-06	185	7,343E-05	7,623E-05	2,8E-06
59	9,141E-05	9,741E-05	5,9999E-06	186	8,264E-05	8,552E-05	2,88E-06
60	9,095E-05	9,728E-05	6,33266E-06	187	9,023E-05	9,315E-05	2,92E-06
61	8,956E-05	9,605E-05	6,49664E-06	188	9,564E-05	9,854E-05	2,9E-06
62	7,661E-05	8,132E-05	4,7102E-06	189	9,843E-05	0,0001013	2,84E-06
63	6,35E-05	6,71E-05	3,59551E-06	190	9,835E-05	0,0001011	2,74E-06
64	5,174E-05	5,455E-05	2,80831E-06	191	2,567E-05	2,745E-05	1,77E-06
65	4,128E-05	4,347E-05	2,19433E-06	192	3,11E-05	3,312E-05	2,02E-06
66	3,184E-05	3,352E-05	1,67871E-06	193	3,73E-05	3,952E-05	2,22E-06
67	2,32E-05	2,442E-05	1,22166E-06	194	8,131E-05	8,354E-05	2,22E-06
68	1,515E-05	1,595E-05	7,99431E-07	195	2,236E-05	2,301E-05	6,52E-07
69	7,474E-06	7,871E-06	3,96791E-07	196	6,033E-05	6,202E-05	1,69E-06
70	0	1,433E-32	1,43339E-32	197	4,245E-06	4,564E-06	3,19E-07
71	0	-8,612E-34	8,61197E-34	198	9,98E-06	1,027E-05	2,89E-07
72	0	-1,608E-32	1,60817E-32	199	8,119E-06	8,395E-06	2,77E-07
73	0	-2,882E-32	2,88167E-32	200	1,992E-05	2,054E-05	6,21E-07
74	0	-3,772E-32	3,77167E-32	201	1,043E-05	1,115E-05	7,22E-07
75	6,916E-05	7,537E-05	6,20455E-06	202	1,195E-05	1,271E-05	7,61E-07
76	8,536E-05	9,388E-05	8,5202E-06	203	1,839E-05	1,901E-05	6,2E-07
77	9,816E-05	0,0001077	9,51452E-06	204	5,438E-06	5,776E-06	3,39E-07
78	0,000103	0,0001122	9,1565E-06	205	2,678E-05	2,764E-05	8,63E-07
79	6,113E-05	6,655E-05	5,42493E-06	206	9,256E-05	9,55E-05	2,94E-06
80	5,858E-05	6,463E-05	6,05448E-06	207	9,65E-05	9,965E-05	3,15E-06
81	5,715E-05	6,363E-05	6,47396E-06	208	5,642E-05	5,822E-05	1,8E-06
82	5,617E-05	6,265E-05	6,47592E-06	209	5,863E-05	6,186E-05	3,23E-06
83	5,399E-05	5,978E-05	5,7904E-06	210	9,203E-05	9,563E-05	3,6E-06
84	4,953E-05	5,381E-05	4,28087E-06	211	6,869E-05	7,214E-05	3,44E-06
85	4,506E-05	4,531E-05	2,49456E-07	212	7,806E-05	8,165E-05	3,59E-06
86	6,139E-05	6,693E-05	5,54552E-06	213	8,597E-05	8,961E-05	3,64E-06
87	6,574E-05	7,216E-05	6,41182E-06	214	9,6E-05	9,949E-05	3,49E-06
88	6,847E-05	7,522E-05	6,75097E-06	215	9,759E-05	0,0001009	3,33E-06
89	7,025E-05	7,684E-05	6,59063E-06	216	6,698E-05	6,911E-05	2,13E-06
90	7,206E-05	7,823E-05	6,16676E-06	217	4,583E-05	4,73E-05	1,47E-06
91	7,445E-05	8,006E-05	5,61851E-06	218	4,971E-05	5,273E-05	3,02E-06
92	8,212E-05	8,755E-05	5,42267E-06	219	4,282E-05	4,561E-05	2,79E-06

93	8,594E-05	9,18E-05	5,85879E-06	220	3,709E-05	3,958E-05	2,48E-06
94	8,871E-05	9,507E-05	6,35928E-06	221	3,142E-05	3,355E-05	2,12E-06
95	9,164E-05	9,856E-05	6,9199E-06	222	2,579E-05	2,753E-05	1,74E-06
96	9,57E-05	0,0001044	8,67672E-06	223	8,59E-05	8,861E-05	2,71E-06
97	8,571E-05	9,404E-05	8,33573E-06	224	7,71E-05	7,954E-05	2,44E-06
98	7,107E-05	7,78E-05	6,73304E-06	225	2,03E-05	2,167E-05	1,37E-06
99	6,657E-06	7,168E-06	5,10515E-07	226	3,56E-05	3,674E-05	1,14E-06
100	2,188E-05	2,343E-05	1,55024E-06	227	8,422E-05	8,666E-05	2,44E-06
101	4,327E-05	4,447E-05	1,19719E-06	228	5,078E-05	5,35E-05	2,72E-06
102	9,281E-05	9,558E-05	2,76511E-06	229	6,434E-05	6,623E-05	1,89E-06
103	1,689E-05	1,737E-05	4,75769E-07	230	9,381E-05	9,699E-05	3,18E-06
104	3,042E-05	3,127E-05	8,51459E-07	231	9,744E-05	0,0001005	3,1E-06
105	5,534E-05	5,685E-05	1,51096E-06	232	5,33E-05	5,488E-05	1,58E-06
106	6,688E-05	6,868E-05	1,79936E-06	233	9,838E-05	0,0001014	2,98E-06
107	7,743E-05	7,948E-05	2,05469E-06	234	9,161E-05	9,427E-05	2,65E-06
108	8,643E-05	8,87E-05	2,27125E-06	235	6,031E-05	6,32E-05	2,89E-06
109	9,329E-05	9,574E-05	2,44731E-06	236	7,041E-05	7,346E-05	3,05E-06
110	9,754E-05	0,0001001	2,58493E-06	237	7,984E-05	8,3E-05	3,16E-06
111	8,377E-05	8,727E-05	3,50018E-06	238	8,781E-05	9,102E-05	3,2E-06
112	9,887E-05	0,0001016	2,68408E-06	239	9,643E-05	9,926E-05	2,83E-06
113	9,724E-05	9,998E-05	2,74598E-06	240	2,541E-05	2,717E-05	1,77E-06
114	8,596E-05	8,87E-05	2,73821E-06	241	4,278E-05	4,533E-05	2,55E-06
115	7,726E-05	7,992E-05	2,66704E-06	242	3,63E-05	3,864E-05	2,34E-06
116	6,744E-05	7E-05	2,56202E-06	243	7,492E-05	7,711E-05	2,19E-06
117	5,741E-05	5,985E-05	2,43924E-06	244	3,071E-05	3,279E-05	2,08E-06
118	4,802E-05	5,033E-05	2,30933E-06	245	2,026E-05	2,168E-05	1,43E-06
119	6,399E-05	6,84E-05	4,4159E-06	246	4,205E-05	4,331E-05	1,26E-06
120	3,982E-05	4,198E-05	2,16951E-06	247	3,071E-05	3,165E-05	9,34E-07
121	3,291E-05	3,491E-05	2,00552E-06	248	1,516E-05	1,623E-05	1,07E-06
122	2,706E-05	2,886E-05	1,80166E-06	249	1,545E-05	1,649E-05	1,03E-06
123	1,699E-05	1,825E-05	1,25376E-06	250	7,908E-05	8,625E-05	7,17E-06
124	1,198E-05	1,289E-05	9,06303E-07	251	7,692E-05	8,435E-05	7,43E-06
125	9,68E-06	9,991E-06	3,11534E-07	252	8,13E-05	8,792E-05	6,62E-06
126	1,043E-05	1,074E-05	3,14856E-07	253	8,759E-05	9,492E-05	7,33E-06
127	7,564E-05	7,876E-05	3,12086E-06	254	8,566E-05	9,355E-05	7,89E-06

Табл.2 Перемещения по у

Перемещения по Y, м							
№	Python	Abaqus	Разница	№	Python	Abaqus	Разница
1	0	-2,521E-31	2,52124E-31	128	-1,022E-05	-1,033E-05	1,09E-07
2	0	8,524E-33	8,52371E-33	129	2,605E-06	2,708E-06	1,03E-07
3	2,433E-05	2,498E-05	6,50201E-07	130	1,072E-05	1,098E-05	2,61E-07
4	-4,549E-05	-4,595E-05	4,62146E-07	131	1,577E-05	1,614E-05	3,75E-07
5	-0,0001898	-0,0001899	4,03295E-08	132	1,878E-05	1,923E-05	4,56E-07
6	-0,0001249	-0,0001255	6,35191E-07	133	2,046E-05	2,097E-05	5,07E-07
7	-0,0003084	-0,000314	5,61298E-06	134	2,136E-05	2,19E-05	5,4E-07
8	-4,877E-05	-4,934E-05	5,65694E-07	135	-0,0001671	-0,0001674	3,02E-07
9	-7,184E-05	-7,227E-05	4,36067E-07	136	-0,0001723	-0,000173	6,62E-07
10	-9,342E-05	-9,394E-05	5,20816E-07	137	-0,0001688	-0,0001695	6,96E-07
11	-0,0002851	-0,0002857	6,39192E-07	138	-0,0001592	-0,0001598	5,89E-07
12	-0,0002952	-0,0002976	2,3832E-06	139	-0,0001449	-0,0001454	4,89E-07
13	-0,0002941	-0,0002962	2,08886E-06	140	-0,0001267	-0,0001271	4,45E-07
14	-0,0001379	-0,0001383	3,80788E-07	141	-0,0001048	-0,0001053	4,49E-07
15	-0,0002217	-0,0002227	9,59984E-07	142	-8,005E-05	-8,051E-05	4,63E-07
16	0	-5,045E-31	5,04507E-31	143	-0,0001057	-0,0001062	4,88E-07
17	0	-5,08E-31	5,08014E-31	144	-0,0001066	-0,000107	4,28E-07
18	0	-5,16E-31	5,1603E-31	145	-0,0001082	-0,0001086	3,39E-07
19	0	-5,302E-31	5,30185E-31	146	-0,0001101	-0,0001103	2,14E-07
20	0	-5,539E-31	5,53897E-31	147	-0,0001133	-0,0001134	5,76E-08
21	0	-5,891E-31	5,89081E-31	148	-0,0001189	-0,0001188	1,21E-07
22	0	-6,344E-31	6,34437E-31	149	-0,0001289	-0,0001286	2,92E-07
23	0	-6,843E-31	6,84343E-31	150	-5,118E-05	-5,137E-05	1,88E-07
24	0	-7,295E-31	7,29461E-31	151	-7,195E-05	-7,224E-05	2,95E-07
25	0	-7,593E-31	7,59344E-31	152	-5,701E-05	-5,746E-05	4,48E-07
26	0	-7,654E-31	7,65419E-31	153	-3,662E-05	-3,702E-05	4,01E-07
27	0	-7,435E-31	7,43503E-31	154	-0,00014	-0,0001404	3,17E-07
28	0	-6,948E-31	6,94794E-31	155	-0,0001297	-0,0001297	8,48E-08
29	0	-6,242E-31	6,24232E-31	156	-9,7E-05	-9,746E-05	4,59E-07
30	0	-5,38E-31	5,38043E-31	157	-8,961E-05	-8,989E-05	2,76E-07
31	0	-4,43E-31	4,42973E-31	158	-4,304E-06	-4,369E-06	6,49E-08
32	0	-3,463E-31	3,46251E-31	159	5,203E-06	5,308E-06	1,04E-07
33	0	-2,548E-31	2,54804E-31	160	1,125E-05	1,148E-05	2,34E-07
34	0	-1,745E-31	1,7454E-31	161	-0,0001417	-0,0001422	5,37E-07
35	0	-1,093E-31	1,09301E-31	162	-0,0001369	-0,0001375	5,77E-07
36	0	-6,019E-32	6,01905E-32	163	-0,0001273	-0,0001278	5,32E-07
37	0	-2,614E-32	2,61356E-32	164	-0,0001137	-0,0001142	4,83E-07
38	0	-4,351E-33	4,35112E-33	165	-9,097E-05	-9,114E-05	1,7E-07
39	0	8,843E-33	8,8434E-33	166	-0,0001042	-0,0001039	2,8E-07
40	0	1,537E-32	1,53712E-32	167	-9,702E-05	-9,69E-05	1,28E-07
41	4,833E-06	4,936E-06	1,03133E-07	168	-9,289E-05	-9,292E-05	3,21E-08
42	9,493E-06	9,701E-06	2,0815E-07	169	-7,748E-05	-7,794E-05	4,53E-07
43	1,389E-05	1,42E-05	3,16703E-07	170	-0,0001156	-0,0001153	3,4E-07
44	1,785E-05	1,828E-05	4,28825E-07	171	1,696E-05	1,735E-05	3,89E-07

45	2,139E-05	2,193E-05	5,43112E-07	172	1,493E-05	1,525E-05	3,27E-07
46	2,428E-05	2,493E-05	6,45421E-07	173	-1,837E-05	-1,863E-05	2,63E-07
47	2,36E-05	2,423E-05	6,22247E-07	174	-2,873E-07	-3,124E-07	2,5E-08
48	2,219E-05	2,277E-05	5,80228E-07	175	5,517E-06	5,609E-06	9,23E-08
49	1,975E-05	2,026E-05	5,15639E-07	176	7,112E-06	7,248E-06	1,36E-07
50	1,568E-05	1,61E-05	4,2254E-07	177	-3,714E-05	-3,72E-05	5,09E-08
51	9,139E-06	9,433E-06	2,94017E-07	178	-3,963E-05	-3,974E-05	1,12E-07
52	-1,165E-06	-1,045E-06	1,19988E-07	179	-3,685E-05	-3,684E-05	1,16E-08
53	-1,741E-05	-1,752E-05	1,12956E-07	180	-1,885E-05	-1,905E-05	1,99E-07
54	-7,551E-05	-7,597E-05	4,58255E-07	181	-1,15E-05	-1,166E-05	1,54E-07
55	-0,0001071	-0,0001076	4,36097E-07	182	-5,162E-05	-5,161E-05	8,29E-09
56	-0,0001348	-0,0001352	3,82006E-07	183	-4,794E-05	-4,785E-05	9,67E-08
57	-0,0001581	-0,0001584	3,61223E-07	184	-5,398E-05	-5,408E-05	9,83E-08
58	-0,000177	-0,0001775	4,42256E-07	185	-5,413E-05	-5,431E-05	1,86E-07
59	-0,0001913	-0,0001919	6,18712E-07	186	-5,192E-05	-5,215E-05	2,35E-07
60	-0,0002005	-0,0002013	8,19396E-07	187	-4,761E-05	-4,786E-05	2,51E-07
61	-0,0002016	-0,0002024	7,5348E-07	188	-4,164E-05	-4,189E-05	2,5E-07
62	-0,0001561	-0,0001559	1,21066E-07	189	-3,449E-05	-3,473E-05	2,41E-07
63	-0,0001421	-0,0001421	1,6426E-08	190	-2,676E-05	-2,699E-05	2,27E-07
64	-0,0001344	-0,0001346	1,39048E-07	191	-3,792E-05	-3,785E-05	7,5E-08
65	-0,00013	-0,0001303	2,8805E-07	192	-4,04E-05	-4,027E-05	1,26E-07
66	-0,0001274	-0,0001278	4,15325E-07	193	-4,395E-05	-4,381E-05	1,38E-07
67	-0,000126	-0,0001265	5,13332E-07	194	-5,24E-06	-5,334E-06	9,36E-08
68	-0,0001252	-0,0001258	5,82513E-07	195	8,655E-06	8,836E-06	1,8E-07
69	-0,0001248	-0,0001255	6,23292E-07	196	3,209E-06	3,248E-06	3,91E-08
70	-0,0001031	-0,0001036	5,00207E-07	197	-3,381E-05	-3,392E-05	1,17E-07
71	-8,177E-05	-8,213E-05	3,64688E-07	198	7,861E-06	8,03E-06	1,69E-07
72	-6,084E-05	-6,108E-05	2,46787E-07	199	1,901E-05	1,947E-05	4,63E-07
73	-4,033E-05	-4,048E-05	1,50324E-07	200	1,348E-05	1,378E-05	2,98E-07
74	-2,008E-05	-2,015E-05	7,03323E-08	201	-6,308E-05	-6,329E-05	2,15E-07
75	-0,0003024	-0,0003067	4,30646E-06	202	-8,554E-05	-8,587E-05	3,36E-07
76	-0,0002877	-0,0002906	2,87975E-06	203	1,772E-05	1,814E-05	4,18E-07
77	-0,0002637	-0,0002652	1,52455E-06	204	-8,95E-05	-8,99E-05	4,01E-07
78	-0,0002303	-0,0002307	3,91492E-07	205	1,473E-05	1,505E-05	3,25E-07
79	-0,0001287	-0,0001291	4,97343E-07	206	-3,768E-05	-3,805E-05	3,71E-07
80	-0,000163	-0,0001633	3,14432E-07	207	-5,381E-05	-5,421E-05	4,04E-07
81	-0,0001952	-0,0001951	3,15413E-08	208	6,692E-06	6,805E-06	1,12E-07
82	-0,000223	-0,0002226	4,4863E-07	209	-0,0001063	-0,0001064	3,45E-08
83	-0,000247	-0,0002462	7,30205E-07	210	-9,642E-05	-9,688E-05	4,56E-07
84	-0,0002676	-0,0002671	5,56553E-07	211	-0,0001114	-0,0001116	2,87E-07
85	-0,0003041	-0,0003087	4,57985E-06	212	-0,0001108	-0,0001112	4,31E-07
86	-0,0002796	-0,0002802	5,86756E-07	213	-0,0001055	-0,0001059	4,69E-07
87	-0,0002623	-0,0002621	1,27353E-07	214	-8,42E-05	-8,463E-05	4,33E-07
88	-0,0002433	-0,000243	3,06799E-07	215	-6,967E-05	-7,009E-05	4,17E-07
89	-0,0002214	-0,0002212	1,8429E-07	216	1,594E-07	1,458E-07	1,36E-08
90	-0,0001967	-0,0001967	2,67946E-08	217	1,081E-05	1,102E-05	2,09E-07
91	-0,000168	-0,0001682	2,41398E-07	218	-9,739E-05	-9,719E-05	1,94E-07
92	-0,0001653	-0,0001656	2,86986E-07	219	-8,794E-05	-8,765E-05	2,82E-07

93	-0,000188	-0,0001883	3,27087E-07	220	-8,052E-05	-8,03E-05	2,15E-07
94	-0,000205	-0,0002055	5,13575E-07	221	-7,575E-05	-7,566E-05	9,16E-08
95	-0,0002165	-0,0002172	7,85706E-07	222	-7,365E-05	-7,369E-05	3,67E-08
96	-0,0002495	-0,0002506	1,04151E-06	223	-2,234E-05	-2,263E-05	2,89E-07
97	-0,0002709	-0,0002723	1,35807E-06	224	-9,512E-06	-9,672E-06	1,6E-07
98	-0,0002858	-0,0002875	1,70383E-06	225	-7,318E-05	-7,332E-05	1,44E-07
99	-1,815E-05	-1,821E-05	5,52122E-08	226	1,33E-05	1,358E-05	2,78E-07
100	-1,844E-05	-1,841E-05	2,5301E-08	227	-1,211E-05	-1,229E-05	1,82E-07
101	3,167E-06	3,222E-06	5,53532E-08	228	-7,563E-05	-7,555E-05	7,93E-08
102	-2,23E-05	-2,243E-05	1,28875E-07	229	2,59E-06	2,613E-06	2,29E-08
103	4,181E-06	4,268E-06	8,71537E-08	230	-6,762E-05	-6,798E-05	3,62E-07
104	3,846E-06	3,921E-06	7,49778E-08	231	-5,76E-05	-5,795E-05	3,5E-07
105	2,236E-06	2,267E-06	3,16942E-08	232	6,731E-06	6,841E-06	1,1E-07
106	7,682E-07	7,7E-07	1,78592E-09	233	-4,625E-05	-4,658E-05	3,35E-07
107	-1,355E-06	-1,387E-06	3,16809E-08	234	-2,258E-05	-2,284E-05	2,62E-07
108	-4,16E-06	-4,224E-06	6,39563E-08	235	-8,067E-05	-8,076E-05	8,92E-08
109	-7,565E-06	-7,656E-06	9,06304E-08	236	-8,258E-05	-8,283E-05	2,45E-07
110	-1,136E-05	-1,147E-05	1,09252E-07	237	-8,074E-05	-8,107E-05	3,35E-07
111	-5,419E-05	-5,466E-05	4,65989E-07	238	-7,555E-05	-7,592E-05	3,64E-07
112	-1,528E-05	-1,54E-05	1,20497E-07	239	-3,429E-05	-3,46E-05	3,11E-07
113	-1,901E-05	-1,914E-05	1,26755E-07	240	-5,606E-05	-5,601E-05	4,77E-08
114	-2,485E-05	-2,497E-05	1,23662E-07	241	-6,921E-05	-6,902E-05	1,89E-07
115	-2,646E-05	-2,656E-05	1,05045E-07	242	-6,313E-05	-6,293E-05	2,05E-07
116	-2,693E-05	-2,7E-05	6,84974E-08	243	-3,664E-06	-3,745E-06	8,08E-08
117	-2,63E-05	-2,631E-05	1,91886E-08	244	-5,862E-05	-5,848E-05	1,42E-07
118	-2,48E-05	-2,477E-05	2,92125E-08	245	-5,539E-05	-5,544E-05	4,64E-08
119	-0,0001476	-0,0001472	3,4063E-07	246	9,414E-06	9,592E-06	1,78E-07
120	-2,288E-05	-2,282E-05	6,14976E-08	247	1,138E-05	1,161E-05	2,35E-07
121	-2,098E-05	-2,092E-05	6,92156E-08	248	-5,684E-05	-5,697E-05	1,3E-07
122	-1,946E-05	-1,941E-05	5,38972E-08	249	-7,35E-05	-7,372E-05	2,2E-07
123	-1,801E-05	-1,801E-05	5,64881E-09	250	-0,000241	-0,0002412	1,21E-07
124	-1,847E-05	-1,85E-05	3,4617E-08	251	-0,000262	-0,0002623	3,27E-07
125	1,582E-05	1,619E-05	3,66444E-07	252	-0,0002178	-0,000218	1,74E-07
126	1,165E-05	1,19E-05	2,56748E-07	253	-0,0002338	-0,0002343	5,35E-07
127	-3,042E-05	-3,08E-05	3,8243E-07	254	-0,0002532	-0,0002538	6,08E-07