

Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого
Физико-механический институт
Высшая школа теоретической механики и математической физики

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПРОЧНОСТИ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ ЭЛЕМЕНТОВ КОНСТРУКЦИИ СЛОЖНОЙ ФОРМЫ

Выполнил

студент гр. 5030103/00201

Похожаева Е.М.

Научный руководитель

доцент ВШТМиМФ, к.ф.-м.н.

Витохин Е.Ю.

Санкт-Петербург
2024

Введение

- **Плиты перекрытий** – это железобетонные изделия, предназначенные для сооружения горизонтальных несущих конструкций в зданиях разного назначения.
- Выступают в качестве чердачных или межэтажных **перегородок**, разделяя внутреннее пространство здания на отдельные зоны.
- Плиты перекрытий совместно с балками и колоннами **образуют жесткий каркас здания**, обеспечивая его устойчивость к ветровым и снеговым нагрузкам.
- Также внутри плит перекрытий можно прокладывать различные инженерные коммуникации, такие как трубы водоснабжения, канализации, электропроводка и так далее.

Актуальность

- Актуальность работы обусловлена тем, что обычно для моделирования железобетонных плит перекрытий используются **оболочки**, в которых распространённые коммерческие пакеты, такие как ABAQUS, ANSYS и другие **автоматически вычисляют усилия и моменты**.
- В случаях с плитами перекрытий сложной формы необходимо прибегнуть к **трёхмерному моделированию**, для которого базовые решения вышеперечисленных КЭ пакетов **не вычисляют усилия и моменты**
- Для решения этой задачи прибегают к **созданию программ на языке программирования Python**.

Цель и задачи работы

Цель – определить величину расчётного армирования необходимого для обеспечения прочности железобетонных плит.

Задачи:

- Выбор плит перекрытий
- Расчёт плит перекрытий в конечно-элементном пакете ABAQUS
- Определение усилий и моментов
- Подбор армирования

Выбор плит перекрытий

- **Сплошные плиты (П)** часто используются в многоэтажных зданиях, где требуется высокая несущая способность и огнестойкость.
- **Многopустотные плиты (ПК)** предлагают преимущество в виде уменьшения веса конструкции, что позволяет снизить нагрузку на фундамент и улучшить теплоизоляцию здания.



Постановка задачи

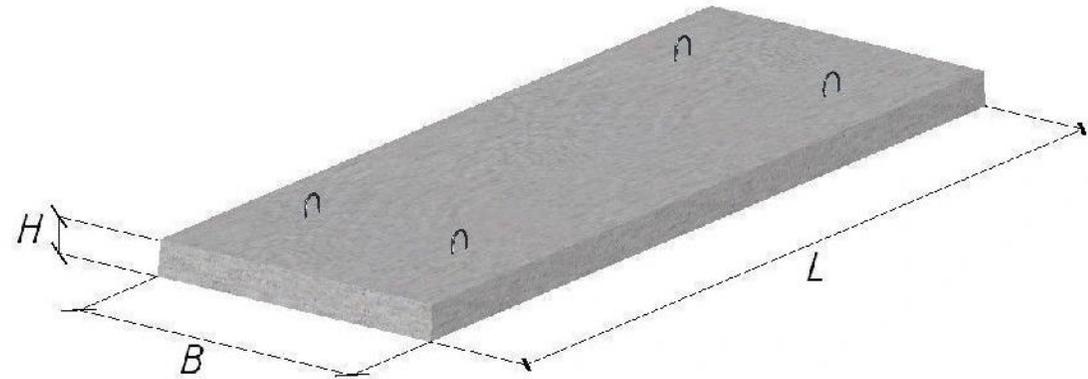
- Необходимо нагрузить три вида плит перекрытий распределённой нагрузкой, при этом шарнирно закрепив их с обеих сторон
- В качестве нагрузки был выбран **трансформатор масляный (ТМ)** с габаритами 2450 x 1250 x 2650 мм и весом в 7100 кг.
- Предположим, что половина трансформатора опирается на плиту перекрытий по центру вдоль ширины, таким образом, распределённая нагрузка по линии будет составлять $3600 \cdot g \text{ Н}$
- Возьмём нагрузку втрое большую и равную 100кН



Постановка задачи для сплошной плиты

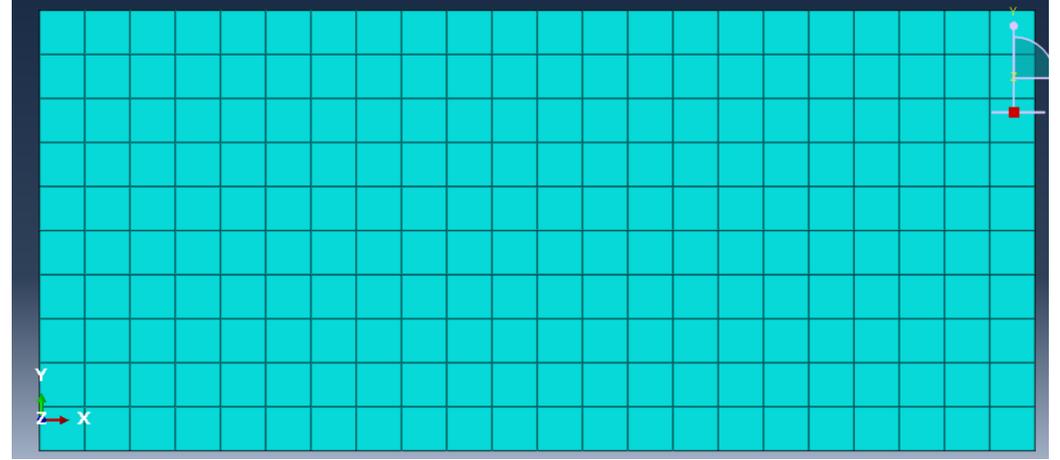
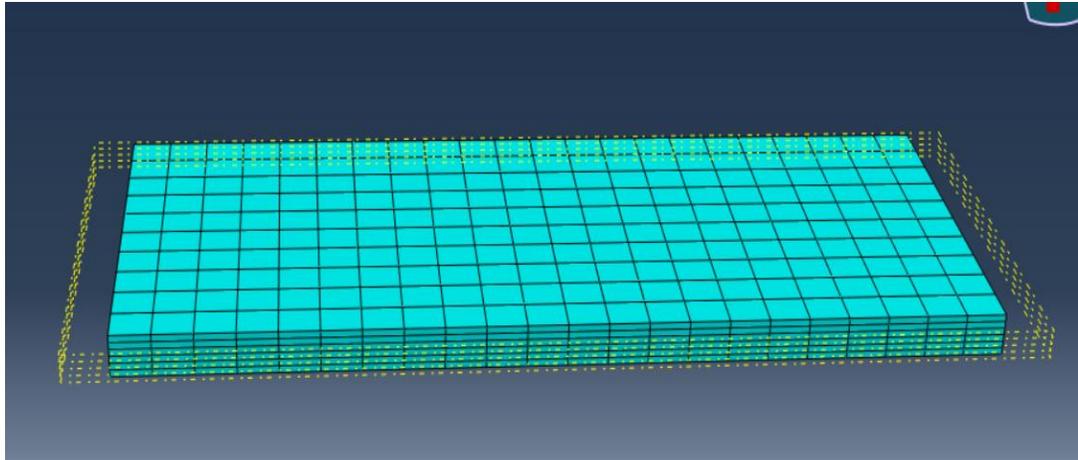
Сплошная плита перекрытий со следующими характеристиками:

- $L = 2680$, $B = 1190$, $H = 120$ мм
- Материал: бетон класса В20
- Физико-механические характеристики для В20



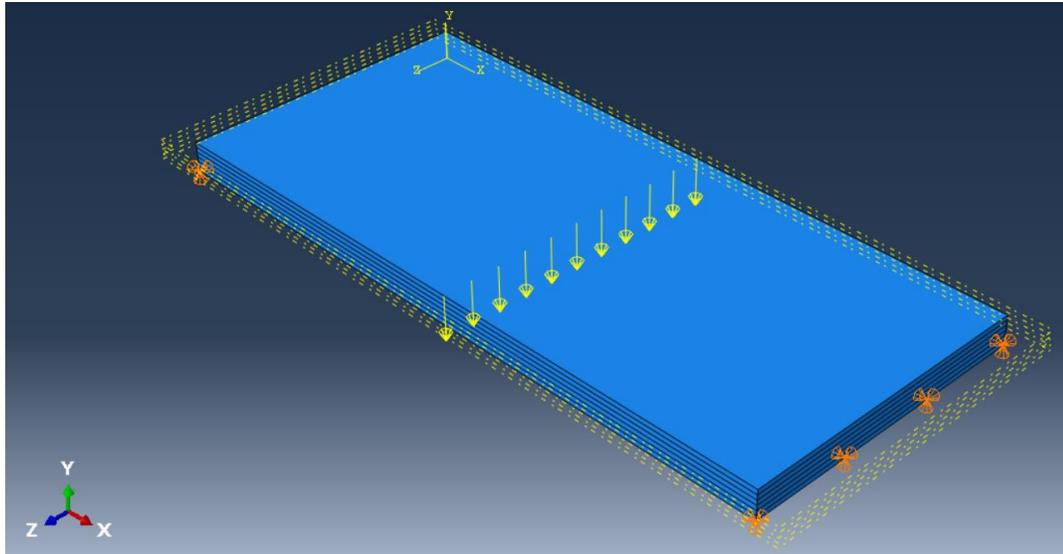
Материал	Плотность, $\frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$	Модуль Юнга, МПа	Коэффициент Пуассона	Предел прочности на сжатие, МПа
В20	2500	27500	0,2	11,5

Построение сетки для оболочки и трёхмерного тела

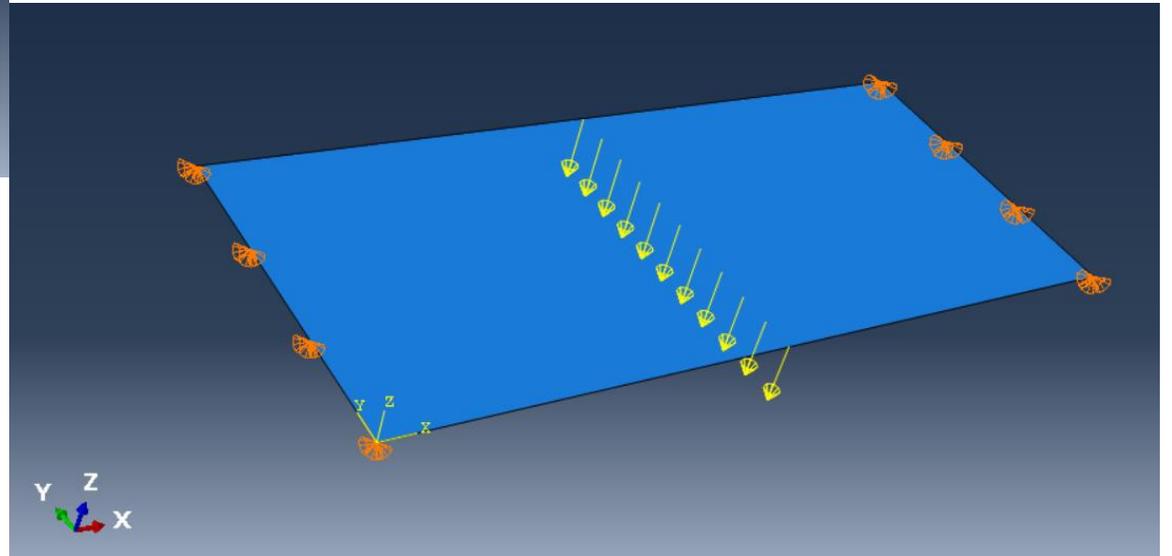


- Для повышения точности вычислений модель плиты была разделена на шесть равных слоёв.
- Была сформирована сетка, используя квадратичные гексаэдры типа C3D20.
- Была сформирована сетка из S8R – восьмиузловой оболочечный элемент

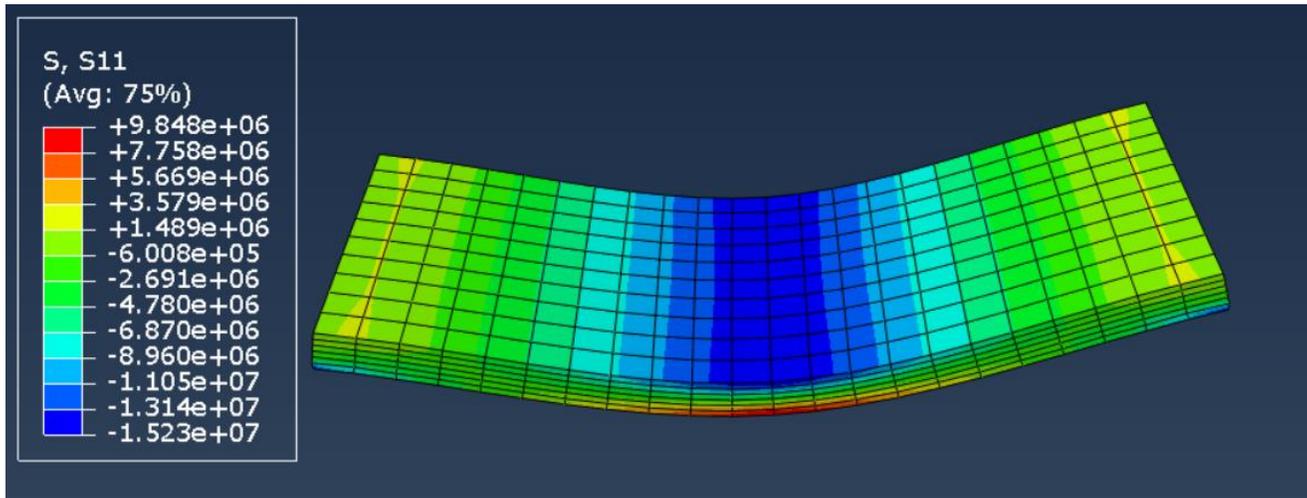
Заделка и приложение нагрузки



- Шарнирная заделка
- Распределённая нагрузка по линии в 100кН

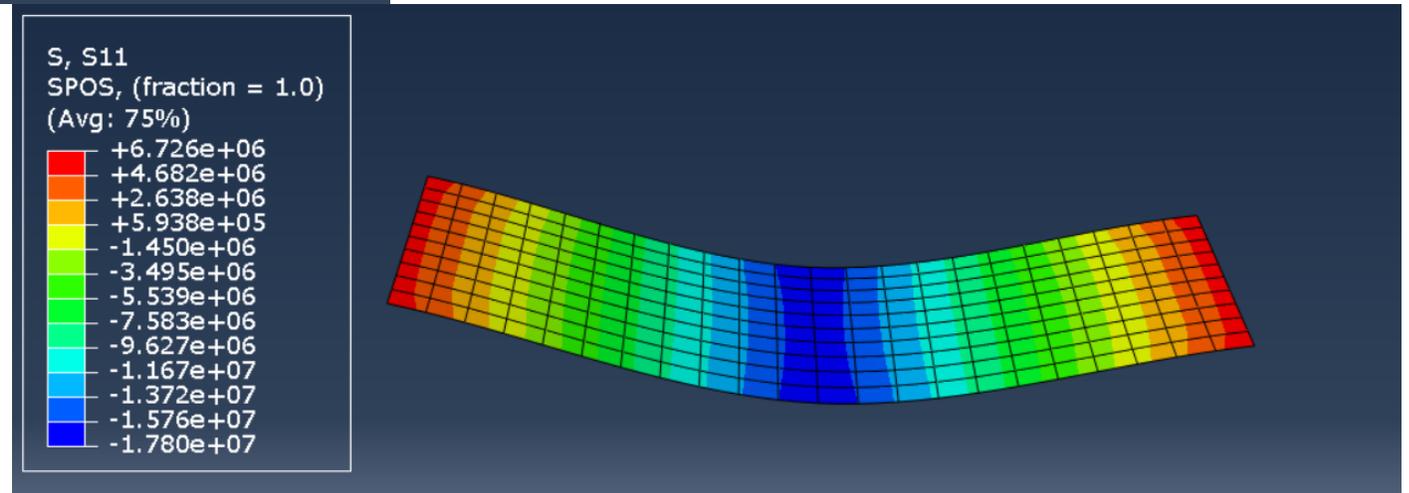


Полученные поля напряжений (Па)



- Напряжения в оболочке получились чуть больше напряжений в трёхмерном теле, но приблизительно одинаковые

- Далее посчитаем усилия и моменты для трёхмерного тела, чтобы сравнить их со значениями для оболочки



Вычисление усилий

- **Усилия** – это интеграл напряжений по толщине плиты.

$$\bullet N = \int_{-\frac{h}{2}}^{\frac{h}{2}} \sigma(x) dx ,$$

где $\sigma(x)$ - напряжение в точке x , h – толщина плиты.

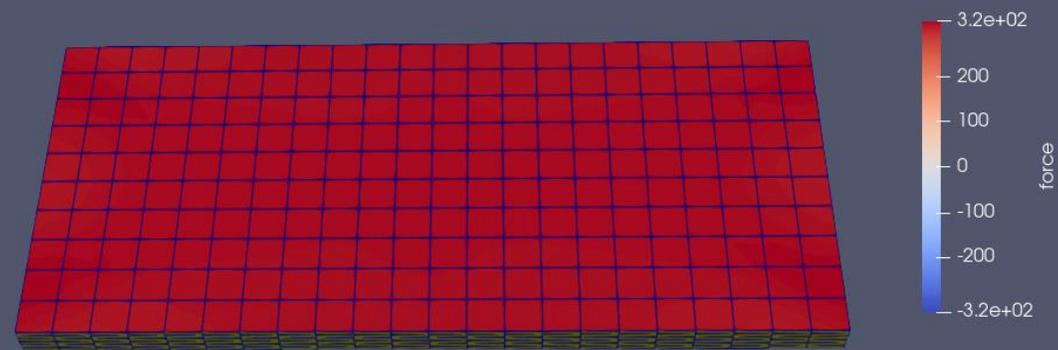
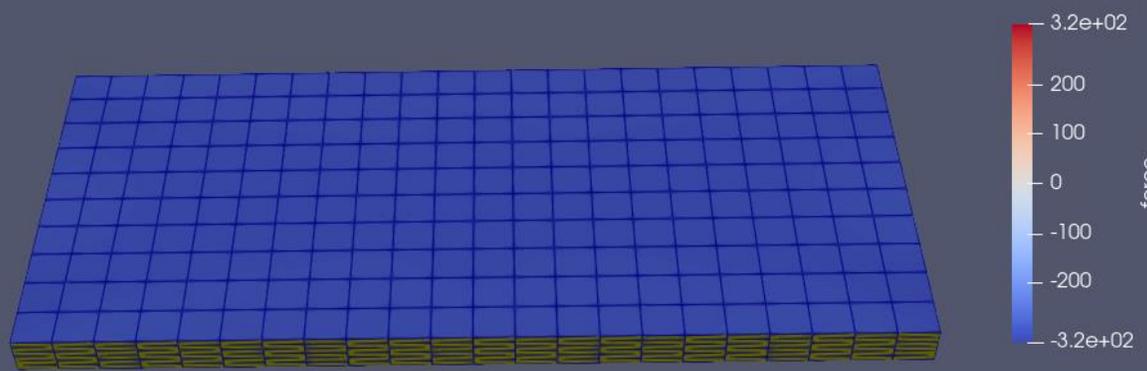
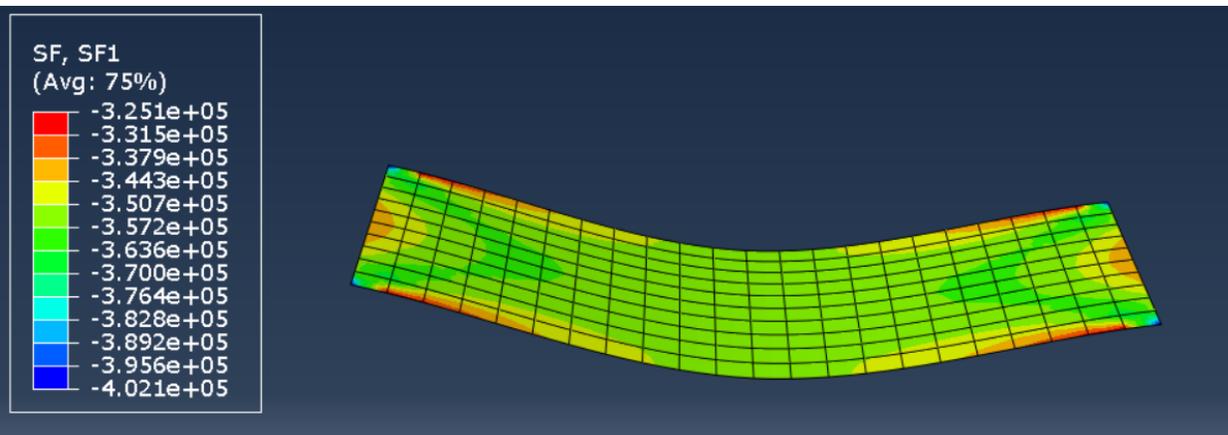
- Считаем интеграл **методом трапеций**

$$\bullet N = \int_{-\frac{h}{2}}^{\frac{h}{2}} \sigma(x) dx = \sum_{j=1}^N \frac{\sigma(x_j) + \sigma(x_{j-1})}{2} h_j ,$$

где $\sigma(x)$ – напряжение в точке x , h_j – шаг по x для текущей итерации, h – толщина плиты.

Усилия в сплошной плите (кН) и оболочке (Н)

- Значения усилий соответственно получились чуть больше в трёхмерном теле чем в оболочке, но приблизительно равны.



Вычисление моментов

- **Моменты** – интеграл напряжений на плечо (считается от середины сечения) по толщине плиты.

$$• M = \int_{-\frac{h}{2}}^{\frac{h}{2}} \sigma(x) x dx$$

где $\sigma(x)$ – напряжение в точке x , x – расстояние от середины сечения, h – толщина плиты

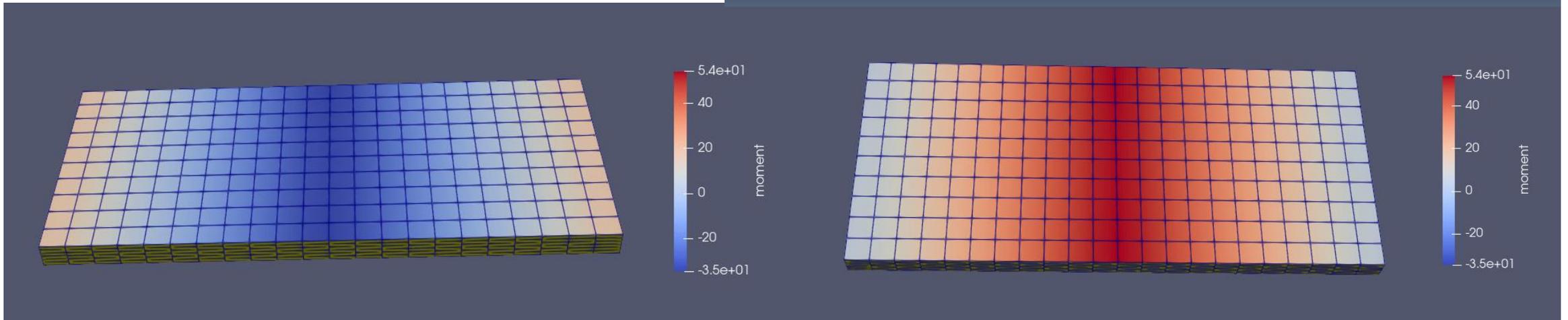
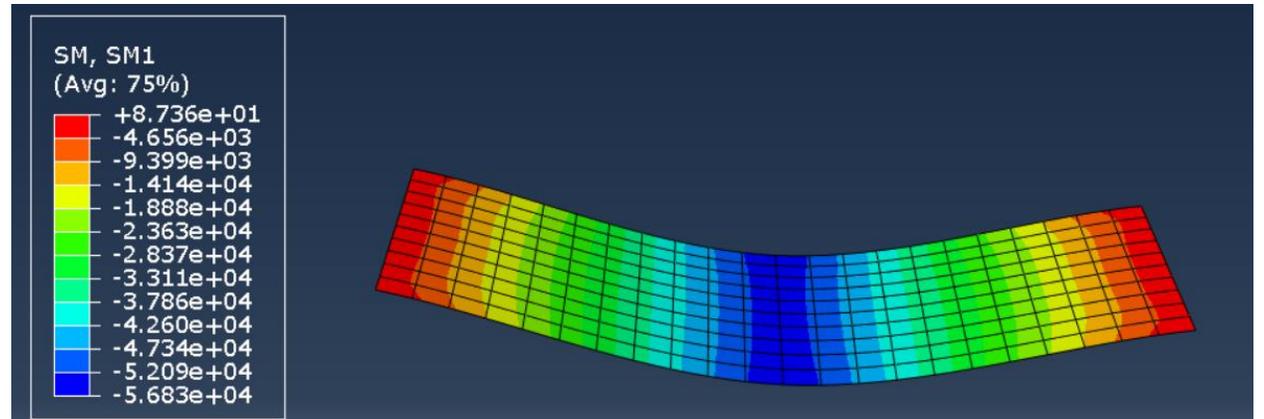
- Считаем **методом трапеций**

$$• M = \int_{-\frac{h}{2}}^{\frac{h}{2}} \sigma(x) x dx = \sum_{j=1}^N \frac{\sigma(x_j)x_j + \sigma(x_{j-1})x_{j-1}}{2} h_j$$

где $\sigma(x)$ – напряжение в точке x , x – расстояние от середины сечения, h_j – шаг по x для текущей итерации, h – толщина плиты.

Моменты в сплошной плите (кН*м) и оболочке (Н*м)

- Значения моментов также получились чуть больше в трёхмерном теле чем в оболочке, но приблизительно равны.



Определение армирования

- При расчете прочности железобетонных конструкций учитываются различные типы нагрузок, включая изгиб, продольное напряжение, сдвиг, кручение и локальное воздействие, такое как сжатие и продавливание в определенных точках.
- Выполняются следующие расчёты по **СП 63 «Бетонные и железобетонные конструкции»**:
 - Расчёт по прочности нормальных сечений по предельным условиям
 - Расчёт изгибаемых элементов
 - Расчёт внецентренно сжатых элементов
 - Расчёт внецентренно растянутых элементов

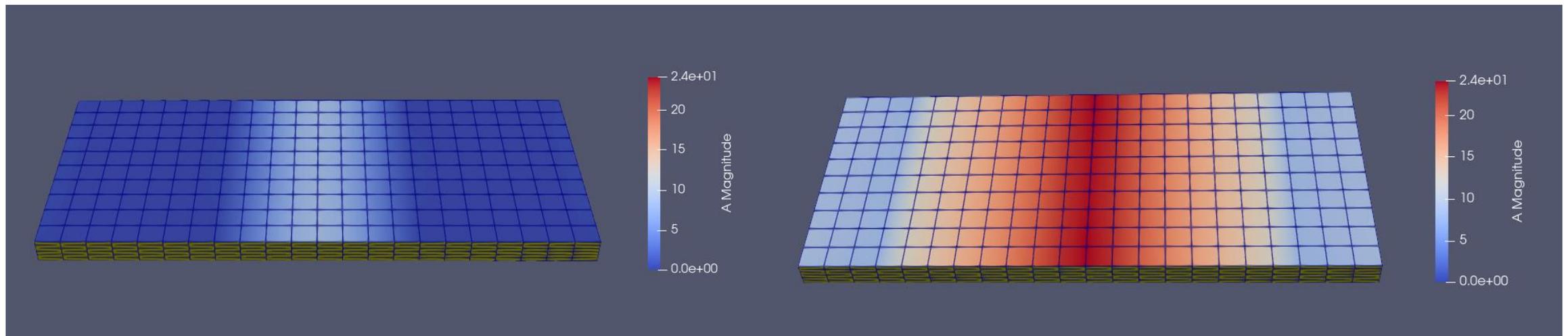
Физико-механические характеристики арматуры:

Материал	Плотность, $\frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$	Модуль Юнга, МПа	Коэффициент Пуассона	Предел прочности на сжатие, МПа	Величина защитного слоя, мм
Сталь	7700	200000	0,3	365	20

Подбор арматуры для сплошной плиты $\left(\frac{\text{см}^2}{\text{пог.м.}}\right)$

Пользуясь приложением (слайд 33), определяем диаметр стержня арматуры, количество и шаг, с которым её укладывают. Получается следующее:

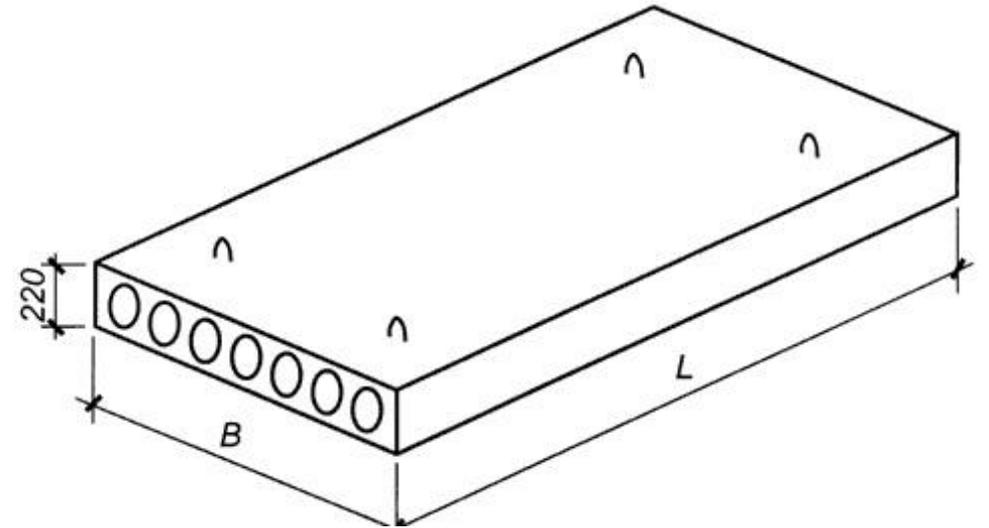
- диаметр стержня арматуры – 28 мм
- 5 стержней на метр с шагом укладки в 200 мм



Постановка задачи для пустотной плиты ПКК1

Пустотная плита перекрытий со следующими характеристиками:

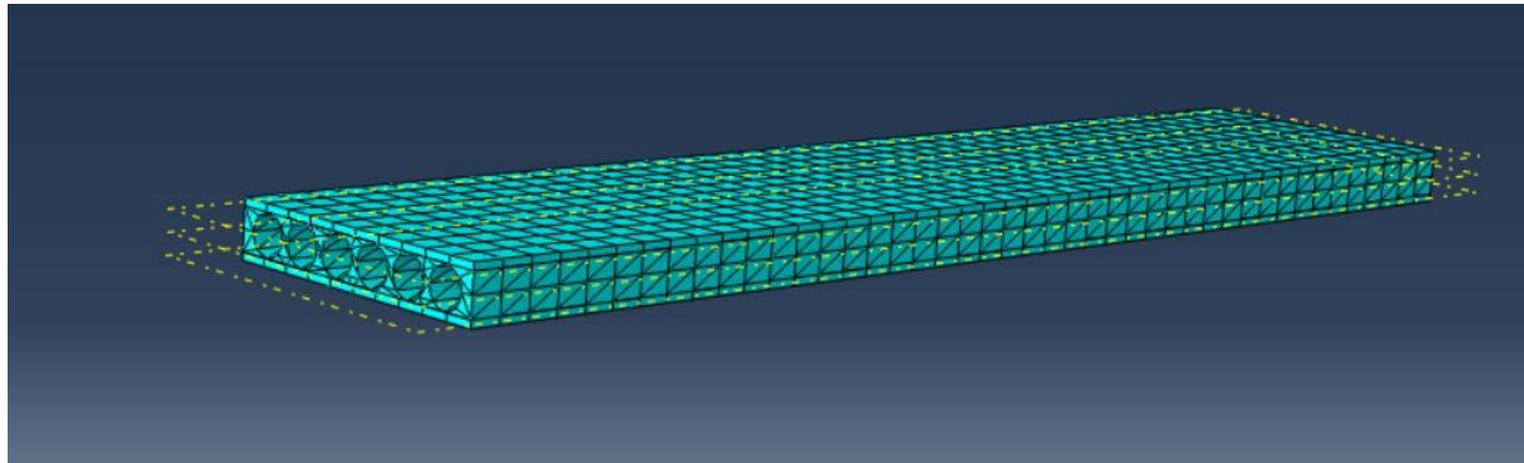
- $L = 5380$, $B = 1190$ мм
- Материал: бетон класса В15
- Физико-механические характеристики для В15



Материал	Плотность, $\frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$	Модуль Юнга, МПа	Коэффициент Пуассона	Предел прочности на сжатие, МПа
В15	2500	24000	0,2	8,5

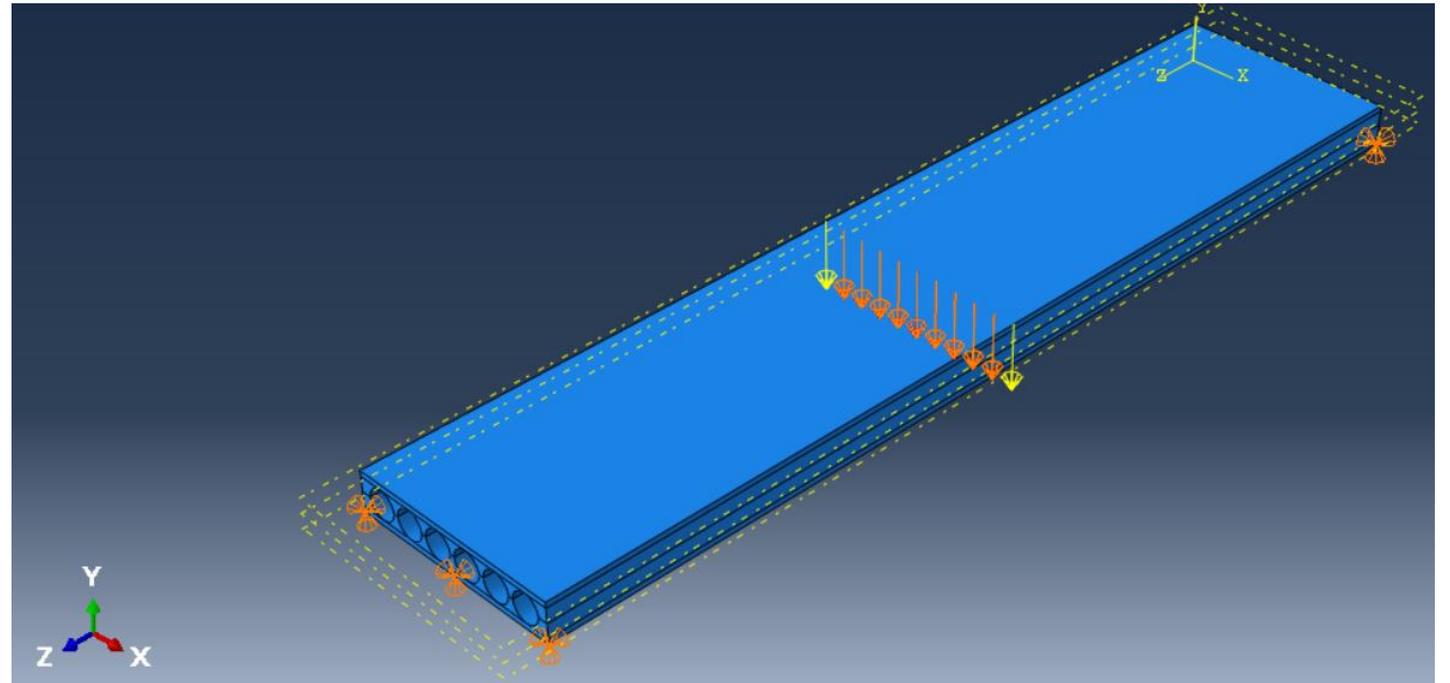
Построение сетки для ПКК1

- Для повышения точности вычислений модель плиты была разделена на три слоя: два слоя – сверху и снизу от отверстий, последний – с отверстиями.
- Была сформирована сетка, используя тетраэдры второго порядка типа C3D10 и квадратичные гексаэдры типа C3D20

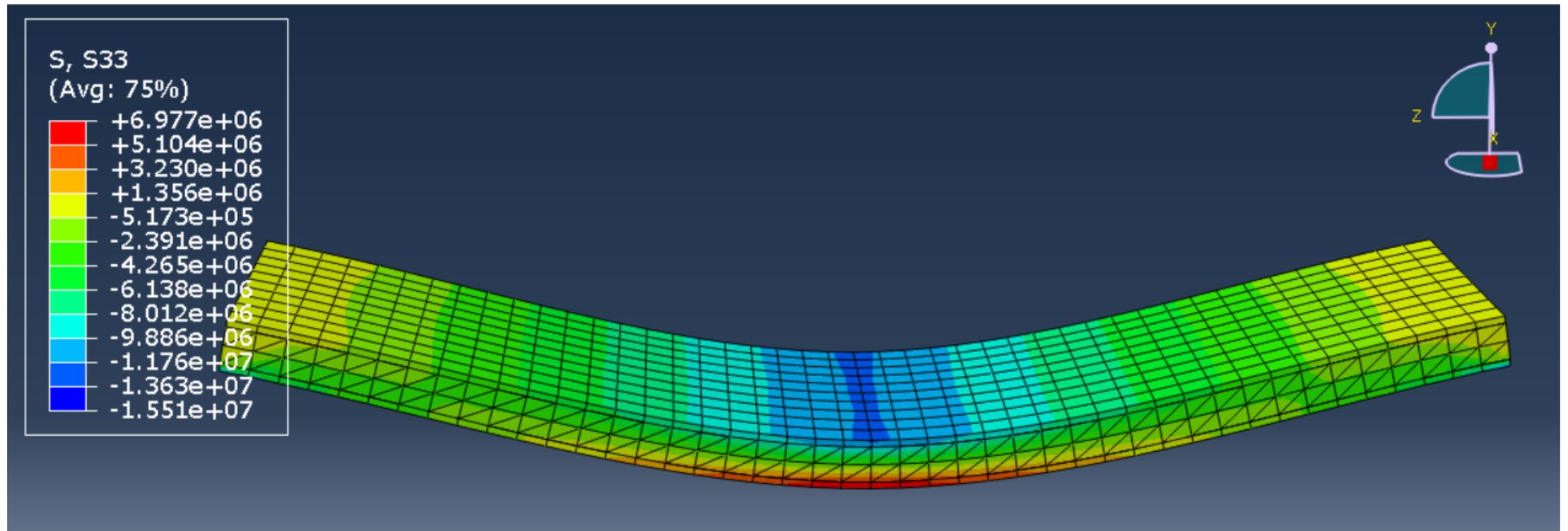


Заделка и приложение нагрузки для ПКК1

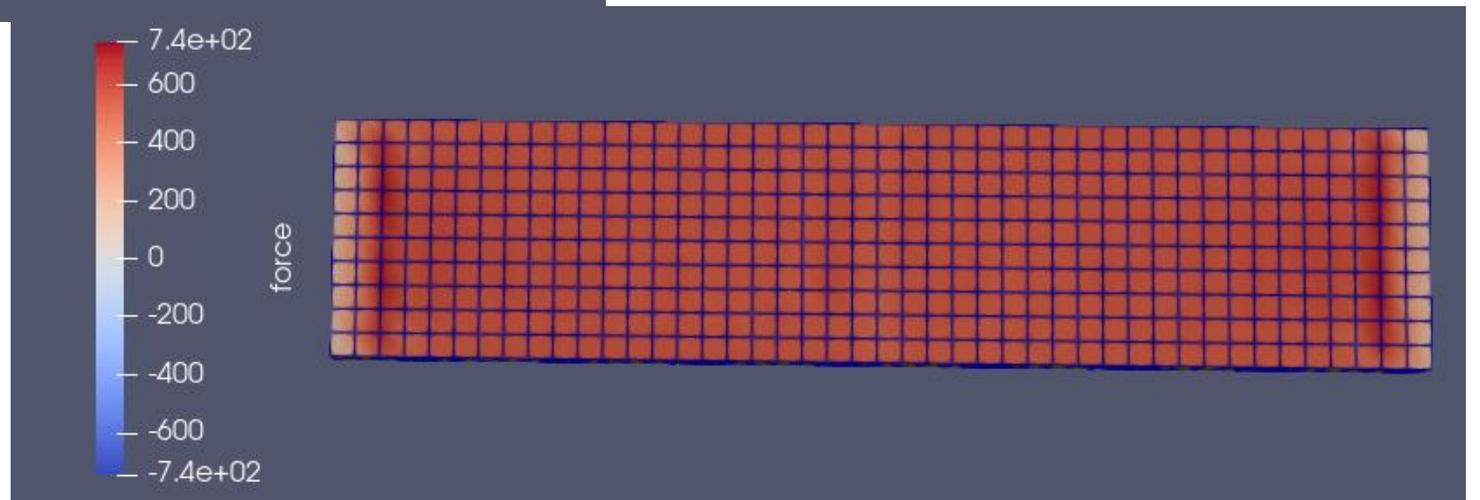
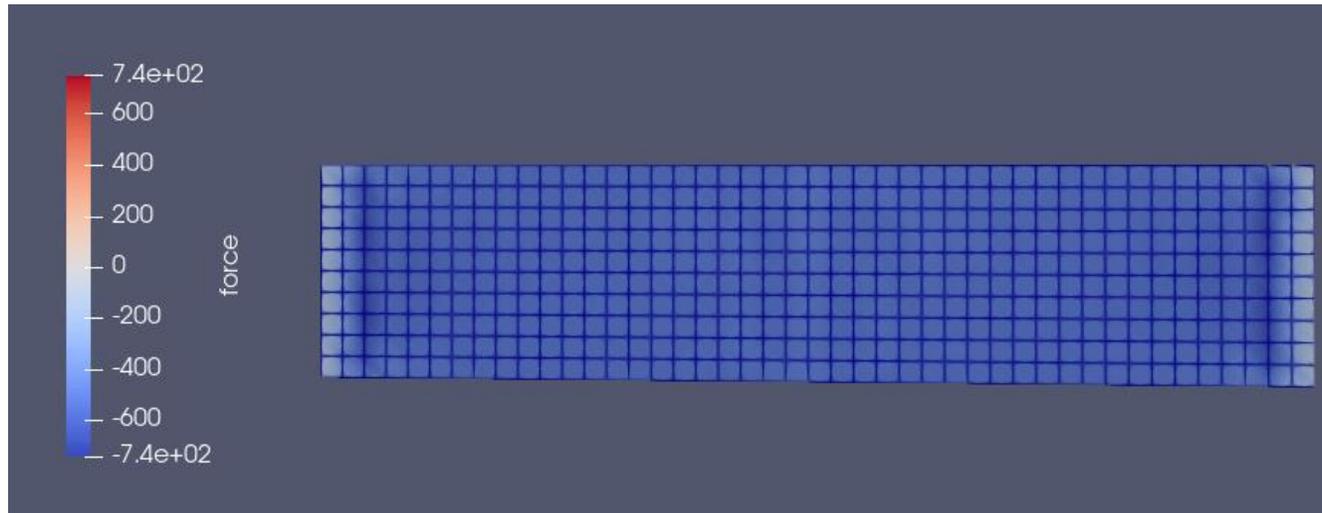
- Шарнирная заделка
- Распределённая нагрузка по линии в 100кН



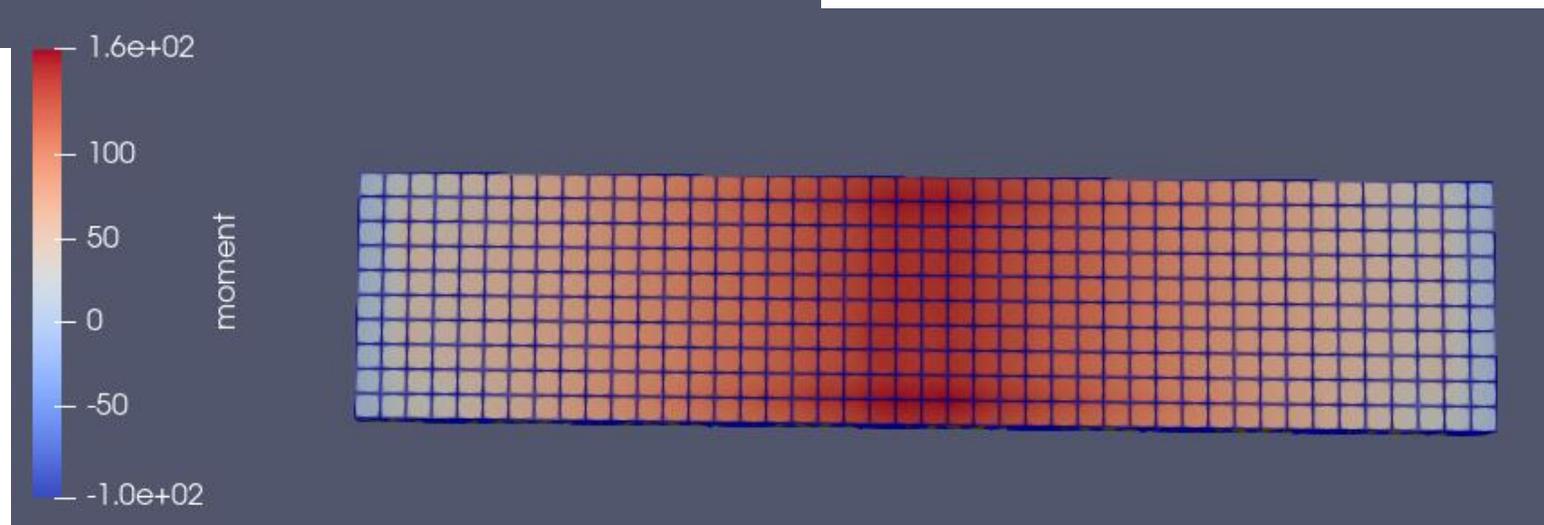
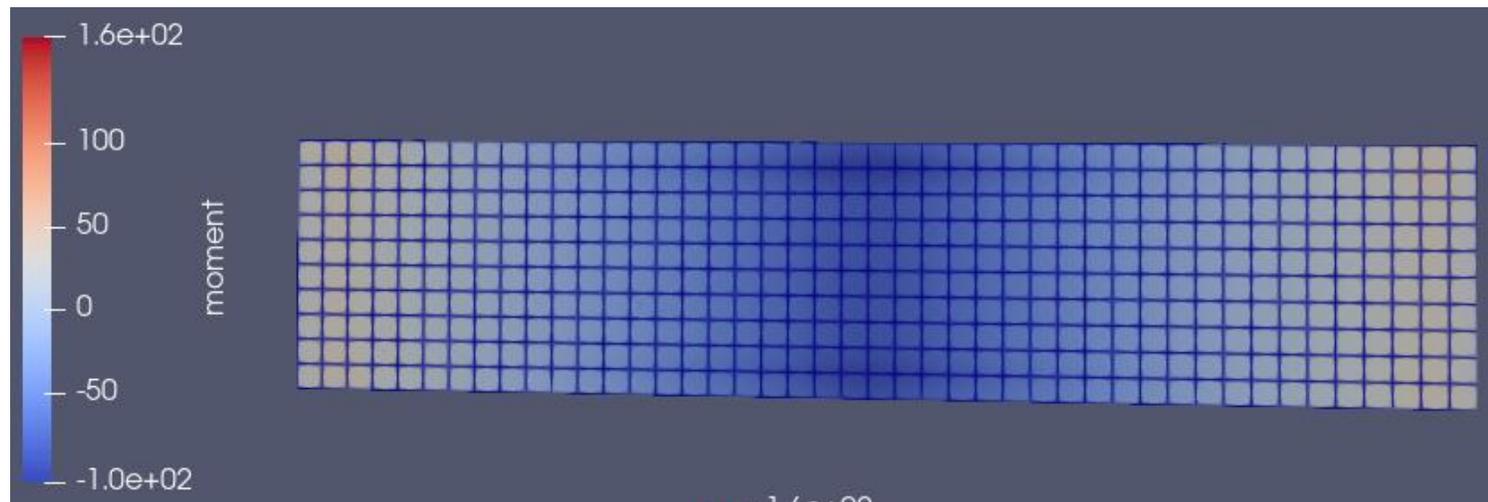
Полученные поля напряжений для ПКК1 (Па)



Усилия для ПКК1 (кН)

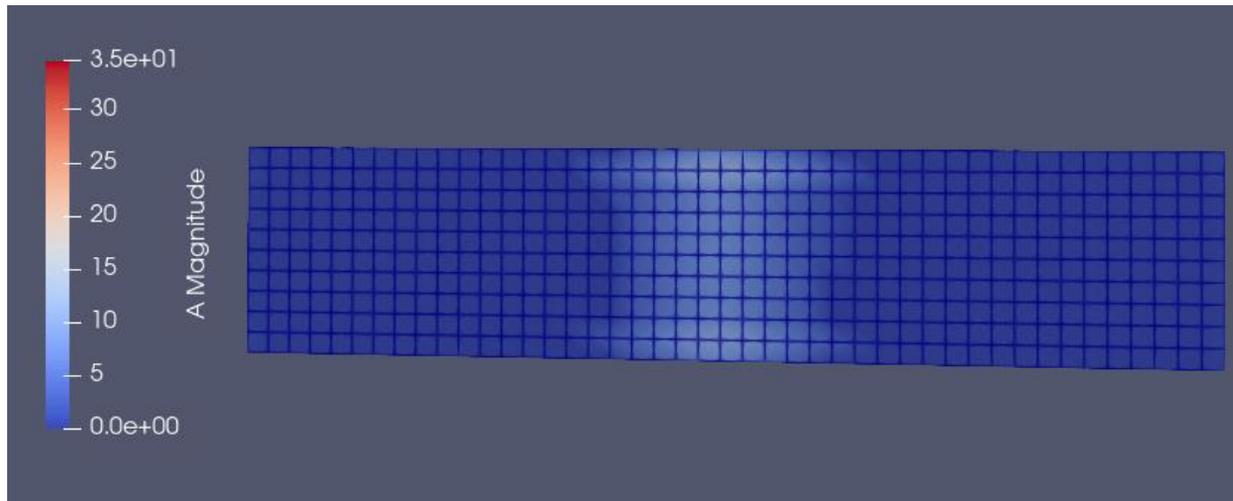


Моменты для ПКК1 (кН*м)

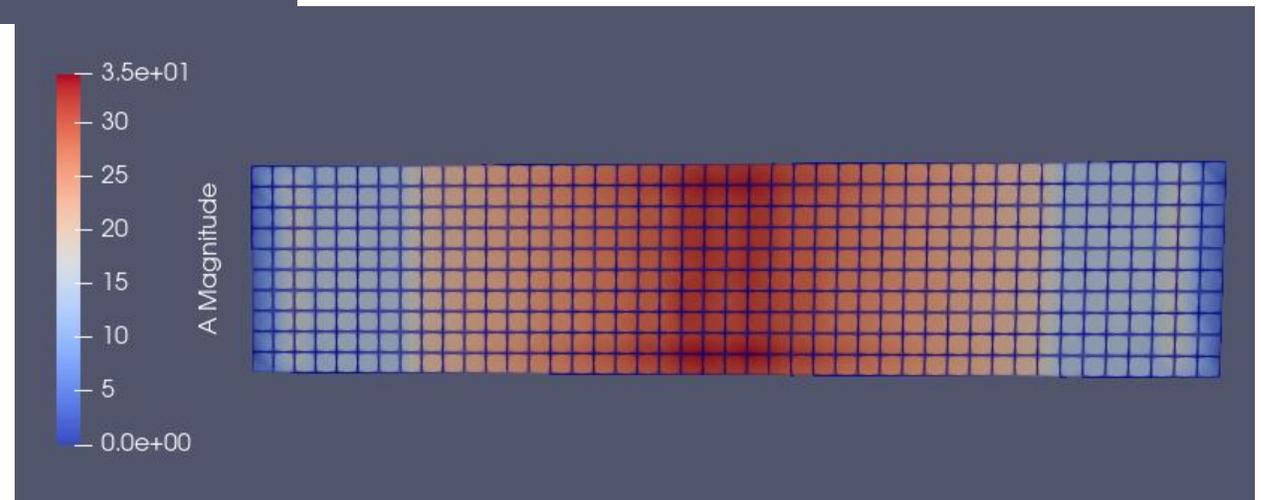


Подбор арматуры для ПКК1 $\left(\frac{\text{см}^2}{\text{пог.м.}}\right)$

Пользуясь приложением (слайд 33), определяем диаметр стержня арматуры, количество и шаг, с которым её укладывают.



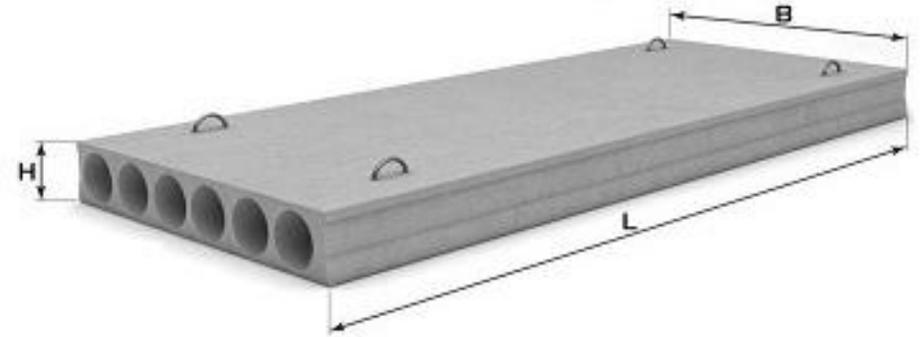
- диаметр стержня арматуры – 28 мм
- 7 стержней на метр с шагом укладки в 143 мм



Постановка задачи для пустотной плиты ПК-8-58.12

Пустотная плита перекрытий со следующими характеристиками:

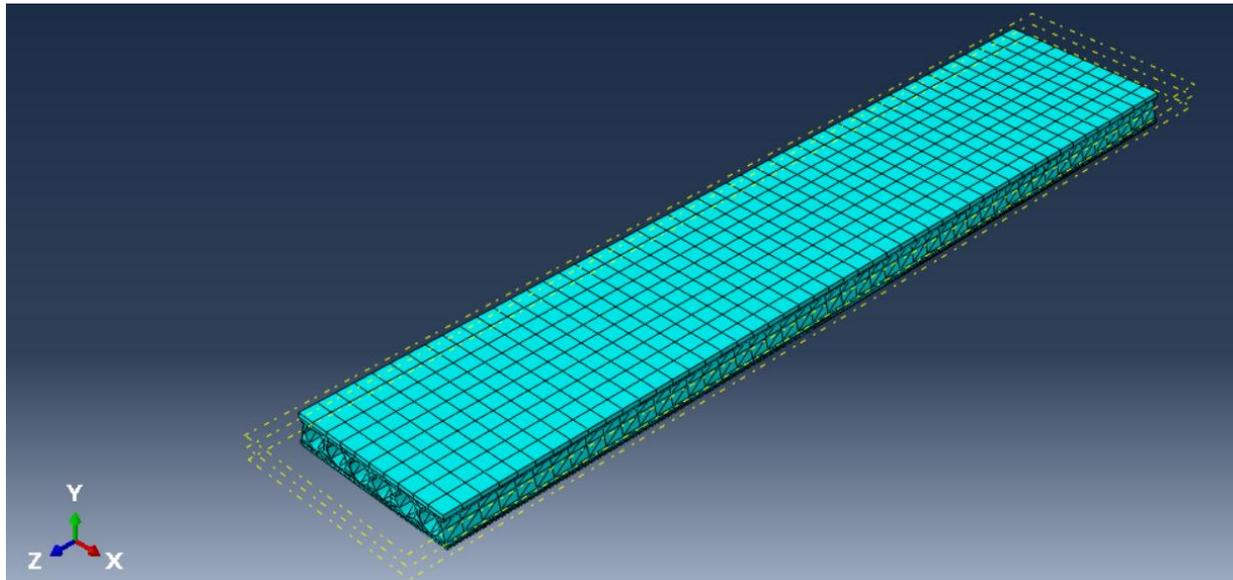
- $L = 5760$, $B = 1190$, $H = 220$ мм
- Материал: бетон класса В25
- Физико-механические характеристики для В25



Материал	Плотность, $\frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$	Модуль Юнга, МПа	Коэффициент Пуассона	Предел прочности на сжатие, МПа
В25	2500	30000	0,2	14,5

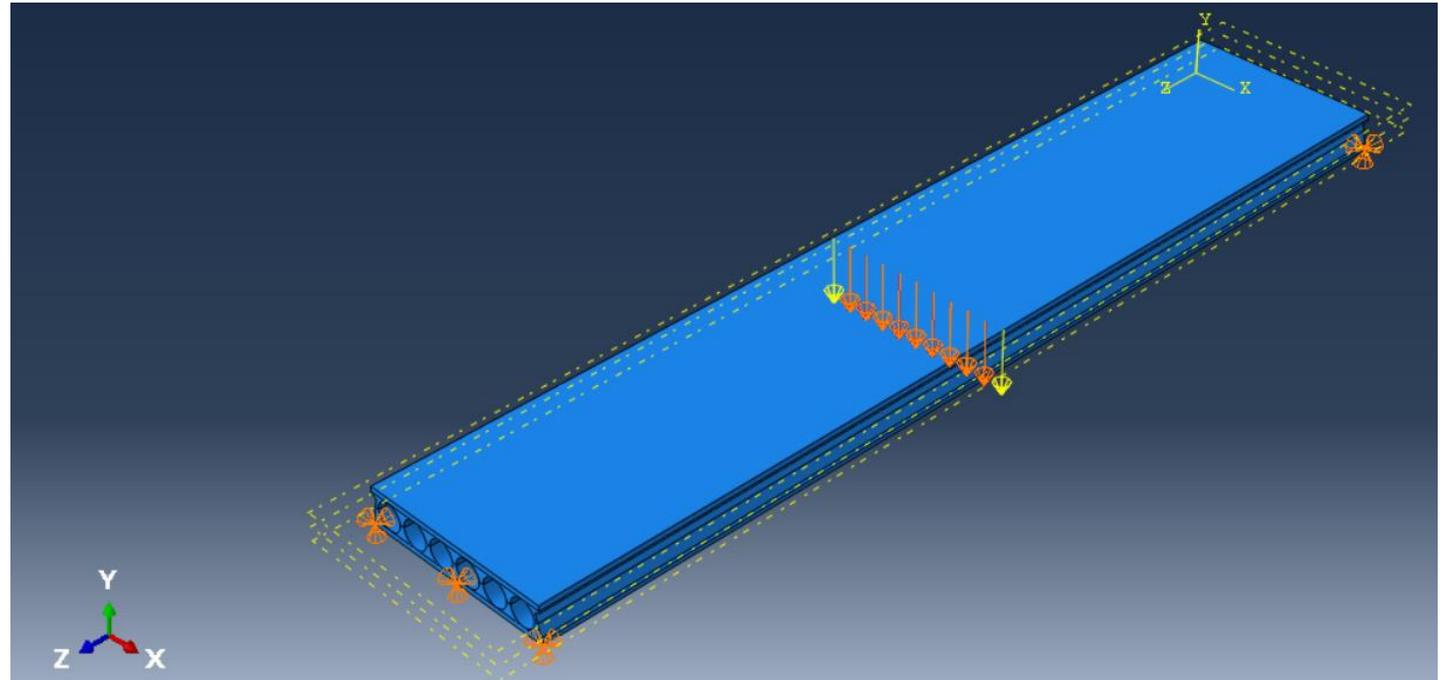
Построение сетки для ПК-8-58.12

- Для повышения точности вычислений модель плиты была разделена на три слоя: два слоя – сверху и снизу от отверстий, последний – с отверстиями.
- Была сформирована сетка, используя тетраэдры второго порядка типа C3D10 и квадратичные гексаэдры типа C3D20.

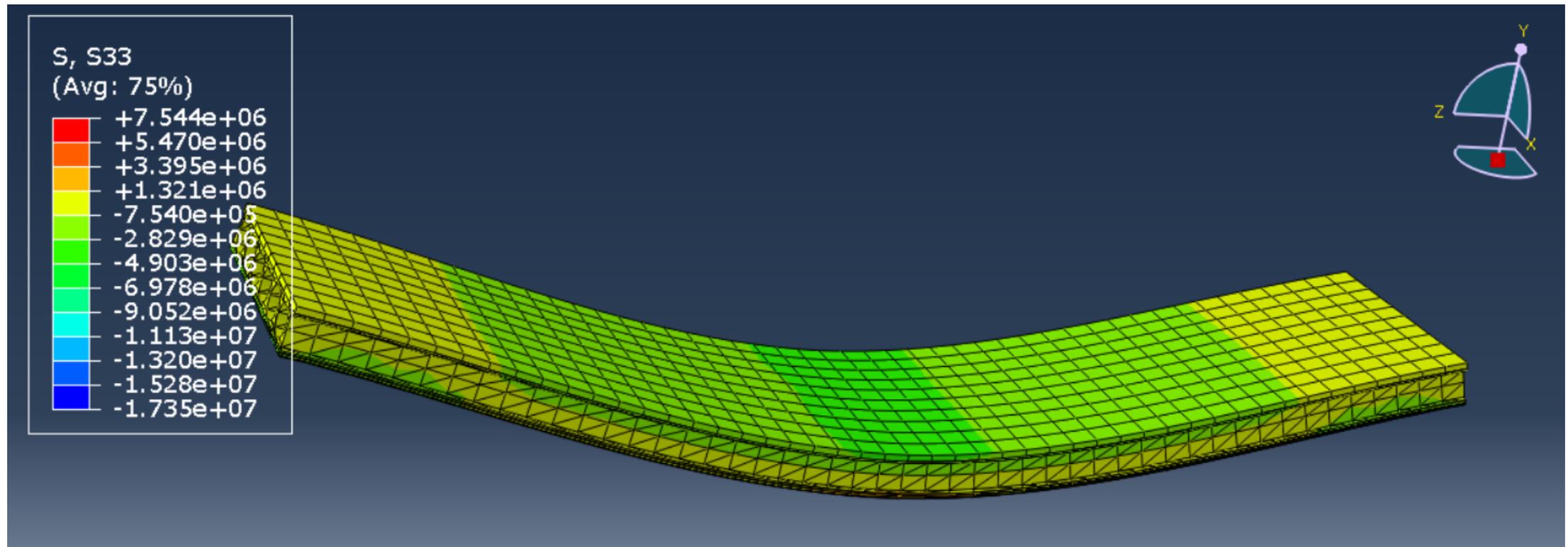


Заделка и приложение нагрузки для ПК-8-58.12

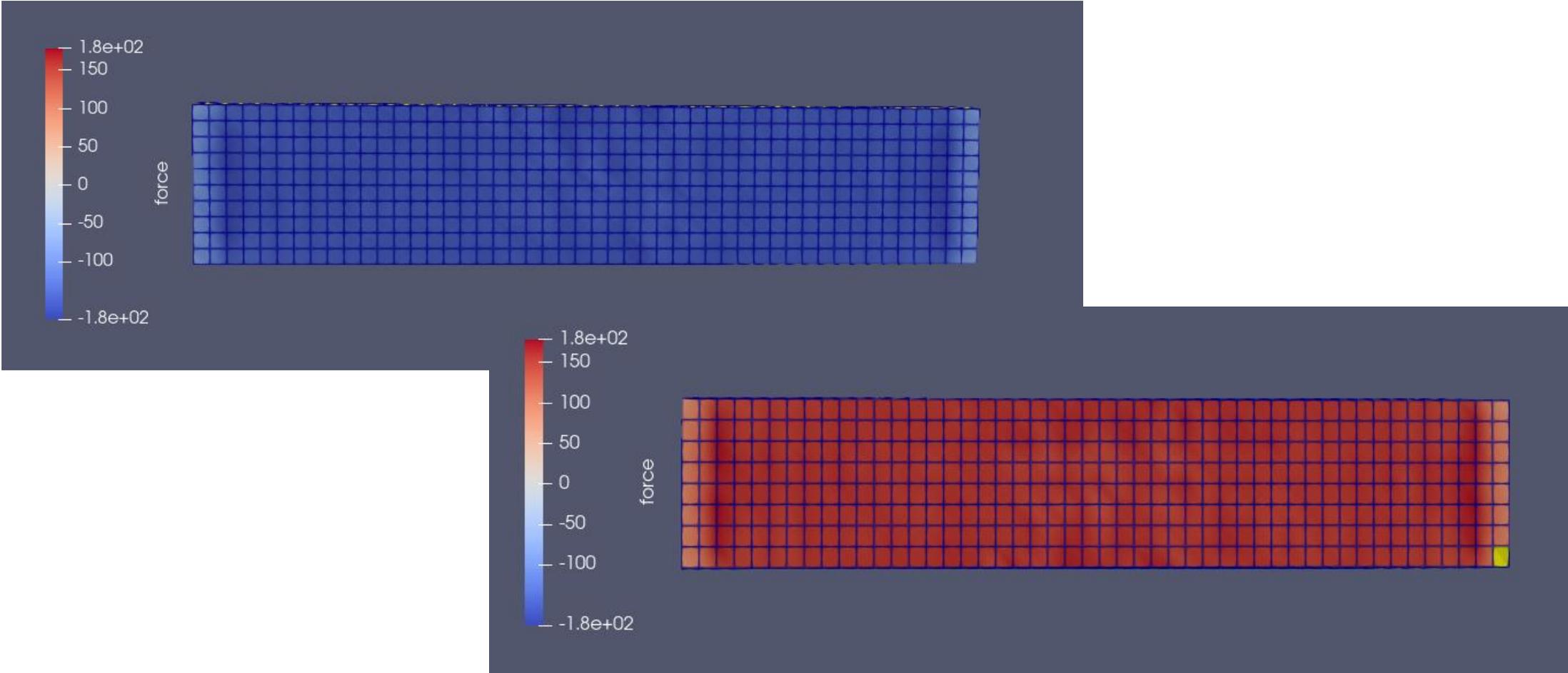
- Шарнирная заделка
- Распределённая нагрузка по линии в 25кН



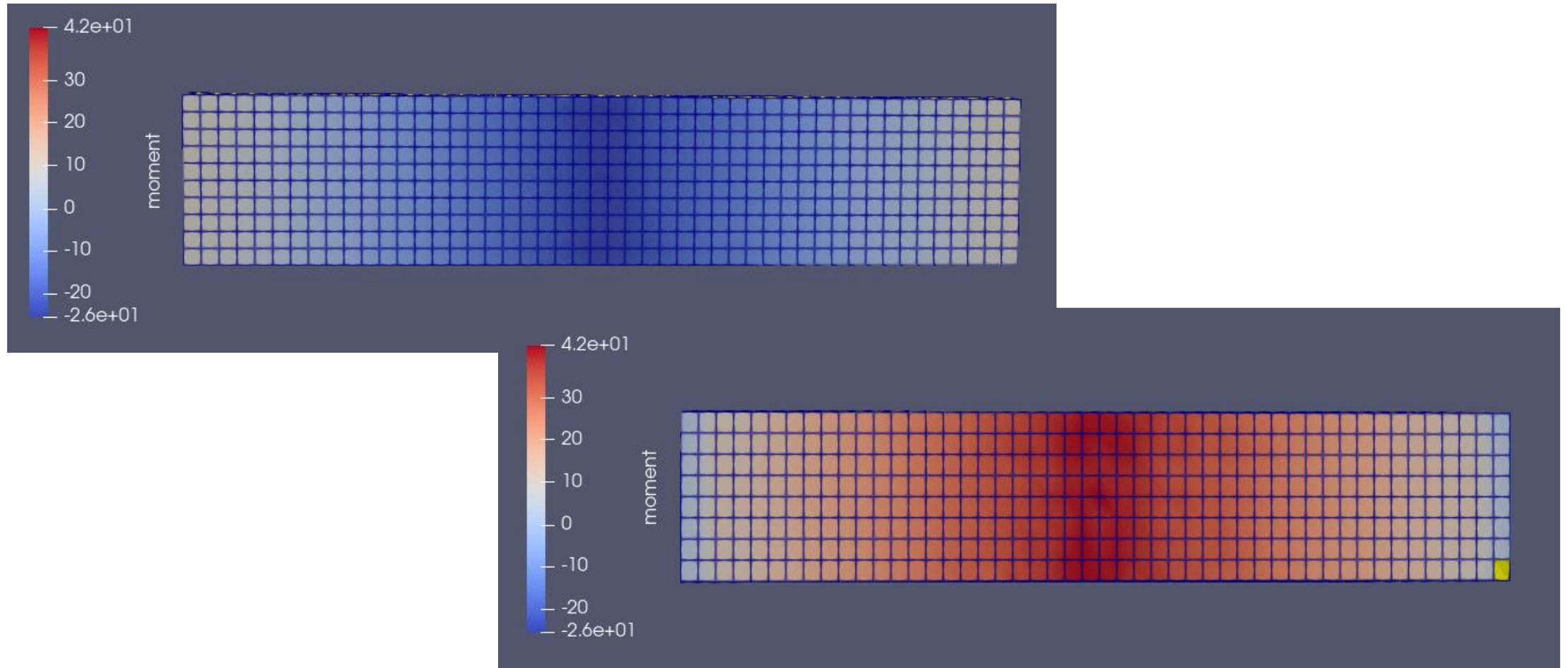
Полученные поля напряжений для ПК-8-58.12 (Па)



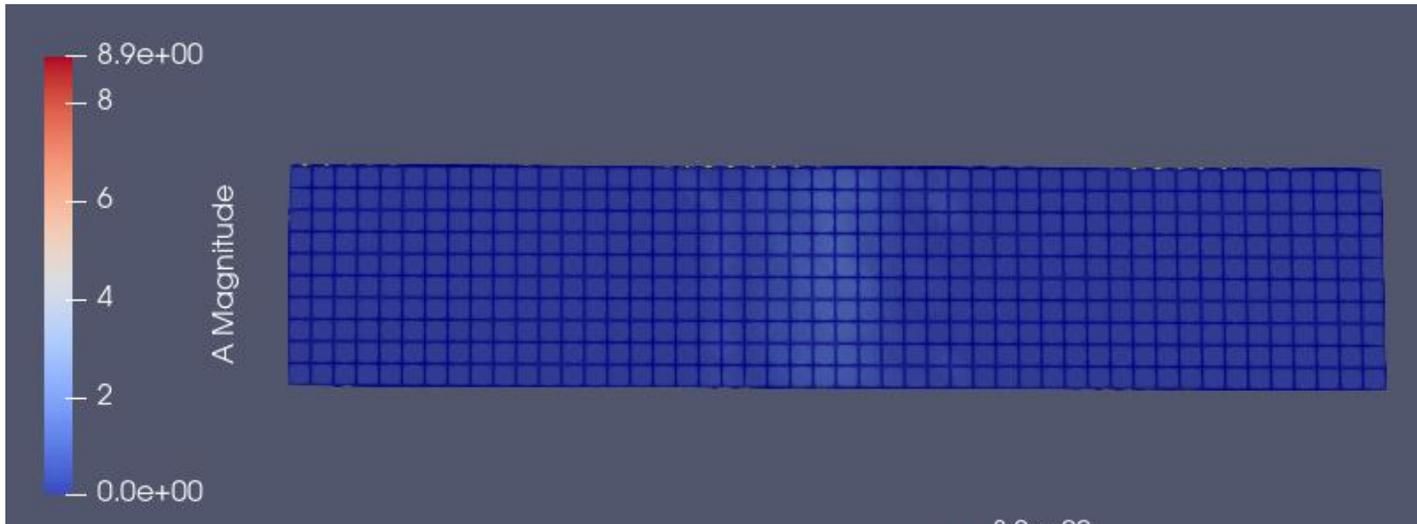
Усилия для ПК-8-58.12 (кН)



Моменты для ПК-8-58.12 (кН*м)

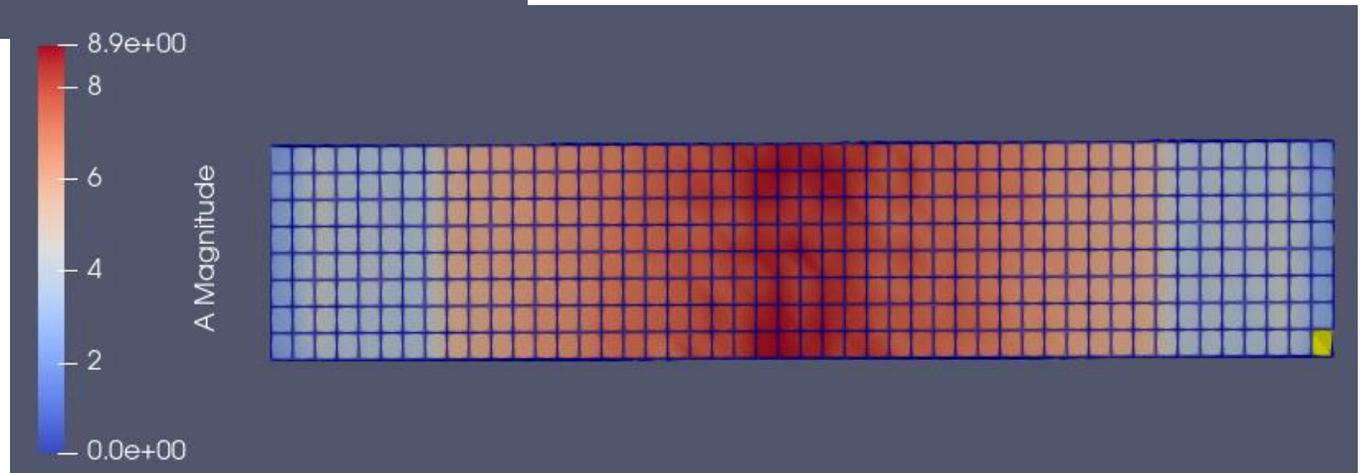


Подбор арматуры для ПК-8-58.12 $\left(\frac{\text{см}^2}{\text{пог.м.}}\right)$



Пользуясь приложением (слайд 33), определяем диаметр стержня арматуры, количество и шаг, с которым её укладывают.

- диаметр стержня арматуры – 16 мм
- 5 стержней на метр с шагом укладки в 200 мм



ИТОГИ

Тип плиты	Нагрузка, кН	Площадь армирования, $\frac{\text{см}^2}{\text{пог.м.}}$		Подобранное армирование	
		сверху	снизу	сверху	снизу
Сплошная плита	100	8	24	Ø16,5 шт.	Ø28,5 шт.
Пустотная плита ПКК1	100	12	35	Ø20,5 шт.	Ø32,5 шт.
Пустотная плита ПК-8-58.12	25	2	9	Ø10,5 шт.	Ø16,5 шт.

Заключение

- **Смоделированы три вида плит перекрытий:** сплошная плита перекрытий и две пустотные плиты перекрытий ПКК1 и ПК-8-58.12
- **Реализована программа** на языке Python для определения усилий и моментов, а также подбора армирования для плит перекрытий
- **Получены результаты расчётов** усилий и моментов для каждой плиты перекрытия
- **Определены площади расчетного армирования,** необходимого для обеспечения прочности плит при действии рассмотренных нагрузок

Приложение

Расчетные площади поперечных сечений и масса арматуры; сортамент стержневой арматуры периодического профиля, обыкновенной и высокопрочной арматурной проволоки [2]

Диаметр, мм	Расчетные площади поперечного сечения, см ² , при числе стержней										Масса, кг/м	Сортамент периодического профиля и армированного проволоки						
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10		S 240	S 400	S 500	S 540	S 800	S 1200	S 1400
3	0,071	0,14	0,21	0,28	0,35	0,42	0,49	0,57	0,64	0,71	0,052	-	-	+	-	-		+
4	0,126	0,25	0,38	0,5	0,63	0,76	0,88	1,01	1,13	1,26	0,092	-	-	+	-	-	+	+
5	0,196	0,39	0,59	0,79	0,98	1,18	1,37	1,57	1,77	1,96	0,144	-	-	+	-	-	+	+
6	0,283	0,57	0,85	1,13	1,42	1,7	1,98	2,26	2,55	2,83	0,222	+	+	+	-	-	-	-
8	0,503	1,01	1,51	2,01	2,51	3,02	3,52	4,02	4,53	5,03	0,395	+	+	+	-	-	-	-
10	0,785	1,57	2,36	3,14	3,93	4,71	5,5	6,28	7,07	7,85	0,617	+	+	+	-	+	-	-
12	1,313	2,26	3,39	4,52	5,65	6,79	7,92	9,05	10,18	11,31	0,888	+	+	+	-	+	-	-
14	1,539	3,08	4,62	6,16	7,69	9,23	10,77	12,31	13,85	15,39	1,208	+	+	+	-	+	-	-
16	2,011	4,02	6,03	8,04	10,05	12,06	14,07	16,08	18,1	20,11	1,578	+	+	+	+	+	-	-
18	2,545	5,09	7,63	10,18	12,72	15,27	17,81	20,36	22,9	25,45	1,998	+	+	+	+	+	-	-
20	3,142	6,28	9,41	12,56	15,71	18,85	21,99	25,14	28,28	31,42	2,466	+	+	+	+	+	-	-
22	3,801	7,6	11,4	15,2	19	22,81	26,61	30,41	34,21	38,01	2,984	+	+	+	+	+	-	-
25	4,909	9,82	14,73	19,63	24,54	29,45	34,36	39,27	44,13	49,09	3,853	+	+	+	+	+	-	-
28	6,158	12,32	18,47	24,63	30,79	36,95	43,1	49,26	55,42	61,58	4,834	+	+	+	+	-	-	-
32	8,042	16,08	24,13	32,17	40,21	48,25	56,3	64,34	72,38	80,42	6,313	+	+	+	+	-	-	-
36	10,18	20,36	30,54	40,72	50,9	61,08	71,26	81,44	91,62	101,8	7,99	+	+	+	+	-	-	-
40	12,56	25,12	37,68	50,24	62,8	75,36	87,92	100,48	113,04	125,6	9,87	+	+	+	-	-	-	-