

Знакомство с МКЭ подсистемой

СтадиКон (СДК)

**Пример расчета пятиэтажного
здания из стальных конструкций с
каркасом с концентрическими
диагональными связями на
сейсмические воздействия**



Содержание

Содержание	2
1. Описание задачи	3
1.1. Исходные данные	3
1.2. Сейсмическая опасность площадки строительства	7
1.3. Расчетная модель здания	7
1.4. Массы здания, учитываемые в расчетных сейсмических ситуациях	8
1.5. Определение параметров расчетного сейсмического воздействия при расчетах по нормам Еврокода	9
1.5.1. Построение расчетных спектров реакций	9
1.5.2. Определение расчетных сейсмических нагрузок	10
1.6. Определение параметров расчетного сейсмического воздействия при расчетах по нормам СП	10
2. Расчетные периоды и формы колебаний здания	11
3. Значения вычисленных нагрузок от сейсмического воздействия	12
4. Нормативные расчеты конструктивных стальных элементов по нормам Еврокода	13
5. Нормативные расчеты конструктивных стальных элементов по нормам СП	17
6. Сравнение результатов нормативных расчетов	21

1. Описание задачи

1.1. Исходные данные

Требуется выполнить расчет на сейсмические воздействия пятиэтажного здания со стальным каркасом с X-образными диагональными концентрическими связями (исходные данные взяты из «Приложение Г; НТП РК 08-01.5-2013 Проектирование сейсмостойких зданий. Часть 1. Проектирование зданий из стальных конструкций. Астана 2024»).

По своему назначению здание относится к категории общественных зданий.

Рассматриваемое здание имеет квадратную форму в плане, с габаритными размерами 18.0×18.0 м по осям колонн. Шаг колонн 6.0 м в обоих направлениях. Высота всех этажей 3.3 м.

Связи расположены на всех этажах в средних пролетах по периметру здания, по осям 1 и 4, и по рядам А и Г.

Сечения конструктивных элементов каркаса здания, принятые в данном примере по предварительному расчету, следующие:

а) Колонны – прокатные стальные двутаврового сечения из профиля НЕА:

– для первого и второго этажей для колонн по рядам Б, В и по осям 2, 3, входящих в связевую систему, принят профиль НЕА 360;

– для первого и второго этажей для средних колонн по рядам Б, В и осям 2, 3 принят профиль НЕА 280;

– для колонн с третьего по пятый этаж по рядам Б, В и по осям 2, 3, входящих в связевую систему, принят профиль НЕА 320;

– для средних колонн с третьего по пятый этаж по рядам Б, В и по осям 2, 3 принят профиль НЕА 240;

– для угловых колонн с первого по пятый этаж по рядам А, Г и по осям 1, 4 принят профиль НЕА 180.

б) Балки – прокатные стальные двутаврового сечения из профиля IPN:

– на перекрытиях над первым, вторым, третьим и четвертым этажами по крайним рядам А, Г и по осям 1, 4 для балок принят профиль IPN 260;

– на покрытии над пятым этажом по крайним рядам А, Г и по осям 1, 4 для балок принят профиль IPN 240;

– на перекрытиях над первым, вторым, третьим и четвертым этажами по средним рядам Б, В и по осям 2, 3 для балок принят профиль IPN 320;

– на покрытии над пятым этажом по средним рядам Б, В и по осям 2, 3 для балок принят профиль IPN 280.

в) Концентрические связи – из замкнутых профилей прямоугольного сечения:

- на первом этаже – из 160×80×10 мм, сталь S355H;
- на втором и третьем этажах – из 140×70×8 мм, сталь S355H;
- на четвертом этаже – из 120×60×8 мм, сталь S235H;
- на пятом этаже – из 100×60×3.6 мм, сталь S235H.

Перекрытия и покрытие приняты монолитными железобетонными толщиной 180мм.

ПЛАН ТИПОВОГО ЭТАЖА

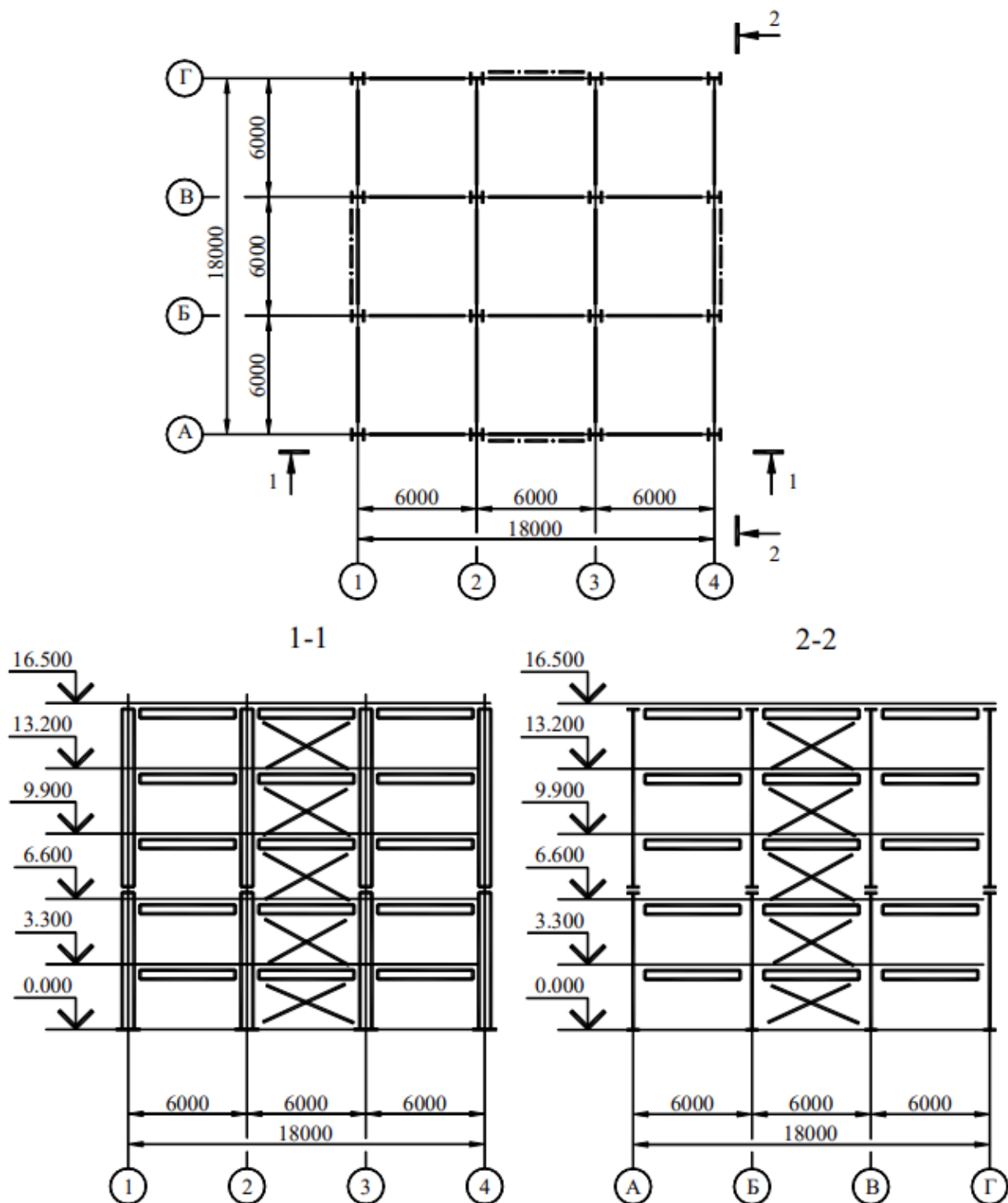


Рис. 1.1.1 - Схематический план и разрезы каркаса здания.

Материал конструктивных элементов здания:

- все колонны каркаса – сталь S355;
- все балки каркаса – сталь S275;
- концентрические связи – сталь указана выше;
- плиты перекрытий и покрытия – бетон класса C25/30.

Принятые в расчетах модули упругости:

- колонны и балки (ригели) каркаса – $2.06 \cdot 10^8$ кН/м²;
- плиты перекрытий и покрытия – $3.1 \cdot 10^7$ кН/м².

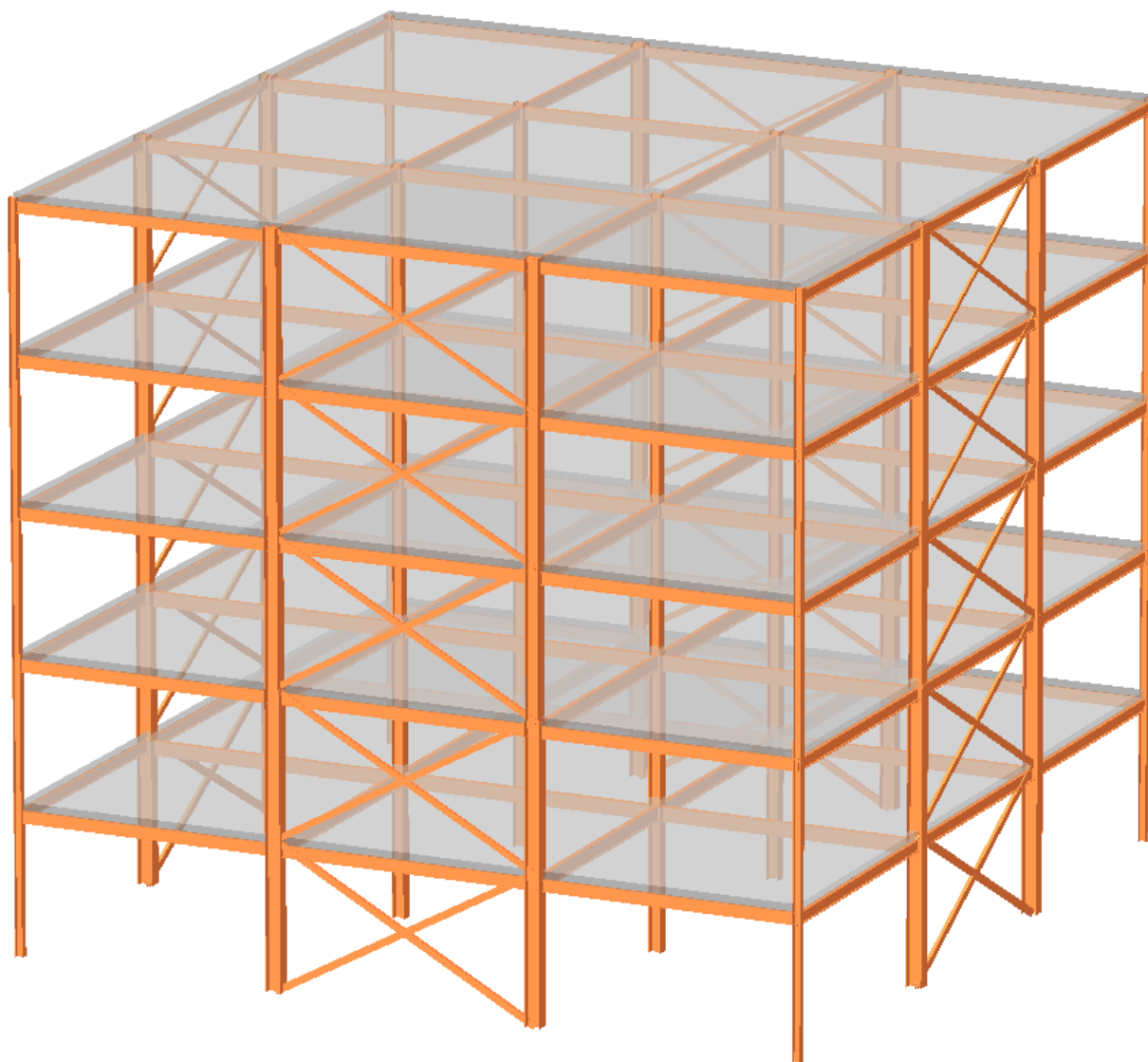


Рис. 1.1.2 – Общий вид каркаса здания.

Таблица 1.1.1 – Ведомость нагрузок. Указаны нормативные значения.

№	Наименование нагрузок	Характеристическое значение	Коэф-т надежности γ_f (Кн)	Длительная часть (Кд)	Примечание
Постоянные нагрузки (G)					
На перекрытия					
1	железобетонная плита перекрытия	24.0 кН/м ³	1.1	—	Вычисляется автоматически
	цементно-песчаный раствор (стяжка)	0.95 кН/м ²			
	полы (ламинат)	0.045 кН/м ²			
	подвесные потолки	0.0125 кН/м ²			
	внутренние перегородки	1.2 кН/м ²			
	Итого (без учета плиты)	2.2075 кН/м ²			
На покрытие					
2	железобетонная плита перекрытия	24.0 кН/м ³	1.1	—	Вычисляется автоматически
	цементно-песчаный раствор (стяжка)	0.95 кН/м ²			
	теплоизоляция	0.05 кН/м ²			
	рулонные кровельные материалы	0.036 кН/м ²			
	Итого (без учета плиты)	1.036 кН/м ²			
Переменные нагрузки (Q)					
3	на междуэтажные перекрытия эксплуатируемых помещений	2.0 кН/м ²	1.2	0.35	
4	снеговая на покрытие	1.2 кН/м ²	1.4	0.7	

1.2. Сейсмическая опасность площадки строительства

Для зоны, в которой расположена площадка строительства здания, принято:

- сейсмичность зоны строительства здания – 9 баллов;
- значение горизонтального расчетного ускорения $a_g = 0,45g$;

Грунтовые условия площадки строительства по сейсмическим свойствам соответствуют типу II.

1.3. Расчетная модель здания

Расчетная модель высотного здания, принятая для выполнения расчетных проверок, представляет собой пространственную совокупность колонн, балок, связей и плит перекрытий, выполненных из оболочечных и стержневых конечных элементов.

Размеры всех конструктивных элементов здания были приняты соответствующими их проектным размерам.

Податливость грунтового основания в расчете не учитывалась.

Расчеты проводились по нормам СП и нормам Еврокода.

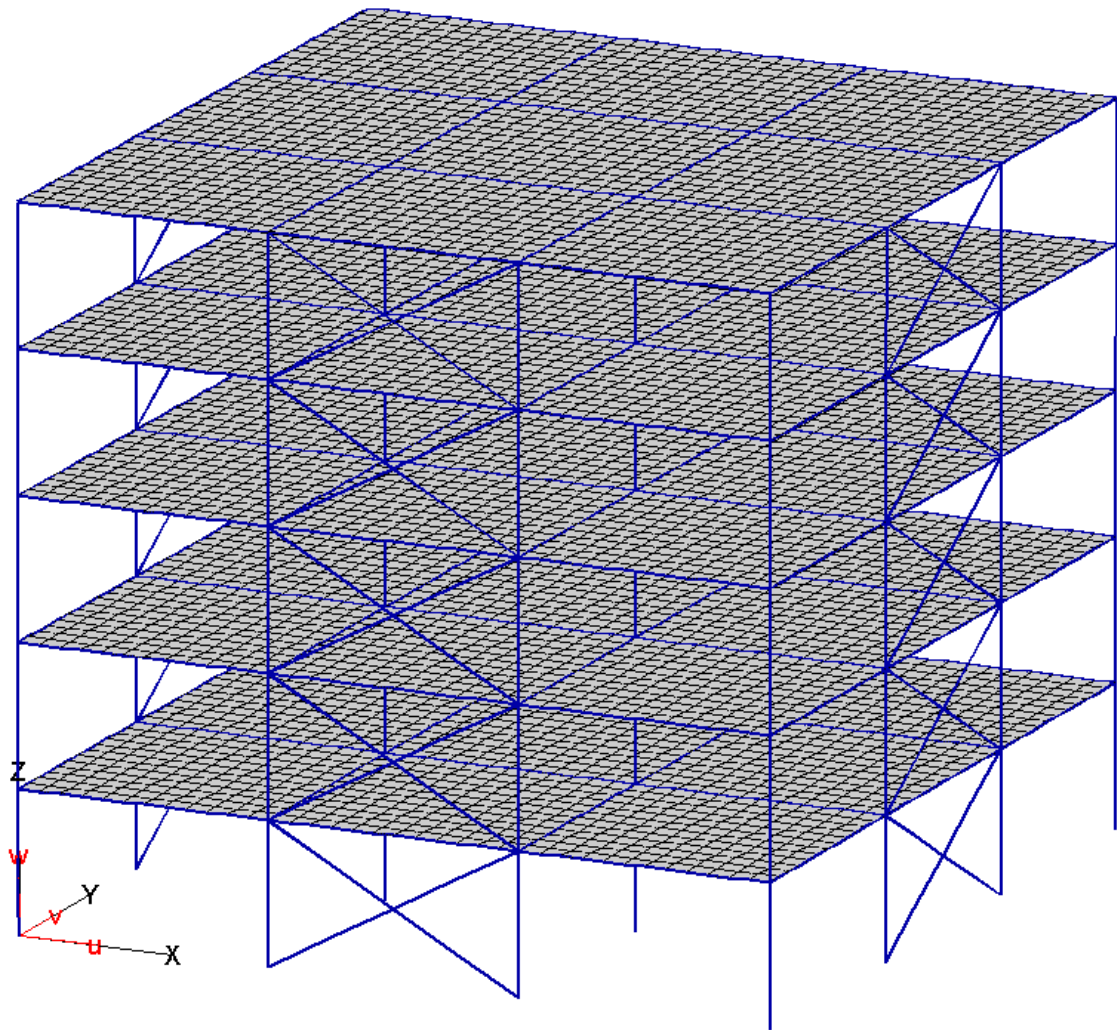


Рис. 1.3.1 – Расчетная модель здания.

1.4. Массы здания, учитываемые в расчетных сейсмических ситуациях

При определении масс здания постоянные и переменные нагрузки комбинировались в соответствии с выражением (1.4.1):

$$\sum_k \frac{G_{k,j}}{g} + \sum_i \left[\psi_{E,i} \cdot \frac{Q_{k,i}}{g} \right], \quad (1.4.1)$$

где:

$G_{k,j}$ – характеристическое значение j-й постоянной нагрузки;

$Q_{k,i}$ – характеристическое значение i-й переменной нагрузки;

g – ускорение силы тяжести (9,81 м/с²);

$\psi_{E,i}$ – коэффициент комбинаций для переменного воздействия i, используемый при определении эффектов расчетного сейсмического воздействия (вычисления масс здания).

Коэффициенты комбинаций $\psi_{E,i}$, принятые в выражении (1.4.1) для вычисления эффектов сейсмических воздействий, рассчитывались с использованием следующего выражения:

$$\psi_{E,i} = \varphi \cdot \psi_{2i}, \quad (1.4.2)$$

где φ – коэффициент, учитывающий уменьшенное участие масс в движении сооружения из-за нежесткой связи между конструкцией и действующей на нее переменной нагрузкой;

ψ_{Ei} – коэффициент комбинаций, учитывающий вероятность того, что нагрузки $Q_{k,i}$ не полностью присутствуют в здании во время землетрясения.

В соответствии с исходными данными:

– нагрузки №1 и №2 являются постоянными;

– нагрузки №3 и №4 относятся к переменным.

В нагружении №3: $\psi_{E,i} = 0.8 \cdot 0.3 = 0.24$;

В нагружении №4: $\psi_{E,i} = 1.0 \cdot 0.0 = 0.0$ (снег).

При расчетах по нормам СП коэффициенты комбинаций также необходимо разделить на соответствующие коэффициенты надежности по нагрузке, приведенные в Таблице 1.1.1.

1.5. Определение параметров расчетного сейсмического воздействия при расчетах по нормам Еврокода

1.5.1. Построение расчетных спектров реакций

Сейсмическое воздействие на рассматриваемое здание принято двухкомпонентным с горизонтальными компонентами (составляющими) в ортогональных направлениях, действующими одновременно. Обе компоненты характеризовались одинаковыми спектрами реакций.

При построении первого расчетного спектра реакций были приняты следующие исходные данные:

- $a_g = 0.45g$;
- $T_B = 0.25$ с, $T_C = 0.64$ с;
- $q = 4$;
- $\beta = 0.2 \cdot S$;
- $S = 1.1$.

Расчетный спектр реакций $S_d(T)$, характеризующий горизонтальные компоненты сейсмического воздействия, определяется следующими формулами:

$$0 \leq T \leq T_B: \quad S_d(T) = \begin{cases} a_g \cdot S \cdot \left[\frac{2}{3} + \frac{T}{T_B} \cdot \left(\frac{2.5}{q} - \frac{2}{3} \right) \right] \\ \geq a_g \cdot S \cdot \frac{2.5}{q} \end{cases}; \quad (1.5.1.1)$$

$$T_B \leq T \leq T_C: \quad S_d(T) = a_g \cdot S \cdot \frac{2.5}{q}; \quad (1.5.1.2)$$

$$T \geq T_C: \quad S_d(T) = \begin{cases} a_g \cdot S \cdot \frac{2.5}{q} \cdot \left[\frac{T_C}{T} \right] \\ \geq \beta \cdot a_g \end{cases}; \quad (1.5.1.3)$$

Количественные значения ординат первого расчетного спектра реакций, построенного в соответствии с (1.5.1.1)-(1.5.1.3) приведены в таблице 1.5.1.1.

Таблица 1.5.1.1 – Значения ординат первого расчетного спектра, характеризующего горизонтальные компоненты сейсмического воздействия второго уровня для продольного и поперечного направлений здания.

T, с	0	0.05	0.1	0.15	0.25	0.5	0.64	0.7	0.8	0.85
S _d (T), в долях g	0.330	0.326	0.322	0.318	0.309	0.309	0.309	0.283	0.248	0.233
T, с	0.9	0.95	1	1.05	1.1	1.3	1.5	1.8	2	3
S _d (T), в долях g	0.220	0.208	0.198	0.189	0.180	0.152	0.132	0.110	0.099	0.099

1.5.2. Определение расчетных сейсмических нагрузок

Расчетная сейсмическая нагрузка на здание от горизонтальной компоненты сейсмического воздействия определялась в соответствии с

$$F_{ik} = \gamma_{Ih} \cdot S_d(T_i) \cdot m_{ik} ,$$

где

γ_{Ih} – мультимодальный коэффициент, значение которого следует принимать 1;

$S_d(T_i)$ – значение спектра расчетных реакций, построенного в соответствии с (1.5.1.1) - (1.5.1.4).

При расчете здания, помимо сейсмических нагрузок учитывались эффекты кручения здания в плане, обусловленные неопределенностями в расположении масс и пространственной вариацией сейсмического движения.

1.6. Определение параметров расчетного сейсмического воздействия при расчетах по нормам СП

Расчетные сейсмические воздействия на здание при выполнении расчетов по нормам СП определялись в соответствии с СП 14.13330.2018.

- Сейсмичность площадки строительства – 9 баллов;
- Категория грунта – 2;
- Были приняты следующие коэффициенты: $K_0 = 1$, $K_I = 0.22$, $K_{psi} = 1$ по таблицам 4.2 / 5.2 / 5.3.

Нагрузки по СП 14.13330-2018

Сейсмичность пл-ки: 9

Категория грунта: 2

☐ Учет нелинейного деформирования грунтов

Тип расчета

☒ Проектный расчет

☐ Поверочный расчет

Таблица 4.2 Таблица 5.2 Таблица 5.3

Амплитуда = 0.88 м/с2

2. Расчетные периоды и формы колебаний здания

Расчетные периоды первых 9 форм собственных колебаний здания приведены в таблице 2.1.

Таблица 2.1 – Значения расчетных периодов собственных колебаний здания.

Номер формы собственных колебаний здания	Формы собственных колебаний	Периоды собственных колебаний, [с]	
		Схема по нормам Еврокода	Схема по нормам СП
1	поступательная в поперечном направлении здания (по оси Y)	0.6695	0.6694
2	поступательная в продольном направлении здания (по оси X)	0.6175	0.6175
3	крутильная в плане	0.3971	0.3971
4	поступательная в поперечном направлении здания (по оси Y)	0.2409	0.2408
5	поступательная в продольном направлении здания (по оси X)	0.2180	0.2179
6	поступательная в поперечном направлении здания (по оси Y)	0.1528	0.1528
7	вертикальная	0.1488	0.1488
8	крутильная в плане	0.1435	0.1435
9	поступательная в продольном направлении здания (по оси X)	0.1367	0.1367

3. Значения вычисленных нагрузок от сейсмического воздействия

В Таблице 3.1 и Таблице 3.2 приведены полученные в данном примере при расчете суммарные значения расчетных сейсмических нагрузок F_i по формам собственных колебаний, вычисленные для двух ортогональных направлений по нормам Еврокода и СП.

Таблица 3.1 – Величины расчетных горизонтальных нагрузок при сейсмическом воздействии по нормам Еврокода.

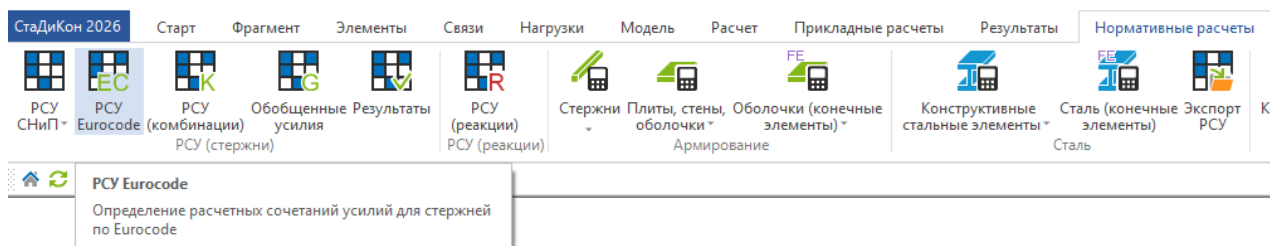
№ формы колебаний	Суммарные значения расчетных сейсмических нагрузок (кН) при воздействии в продольном направлении здания (по оси X)	Суммарные значения расчетных сейсмических нагрузок (кН) при воздействии в поперечном направлении здания (по оси Y)
1	0	2616
2	2744	0
3	0	0
4	0	459
5	463	0
6	0	168
7	0	0
8	0	0
9	157	0

Таблица 3.2 – Величины расчетных горизонтальных нагрузок при сейсмическом воздействии по нормам СП.

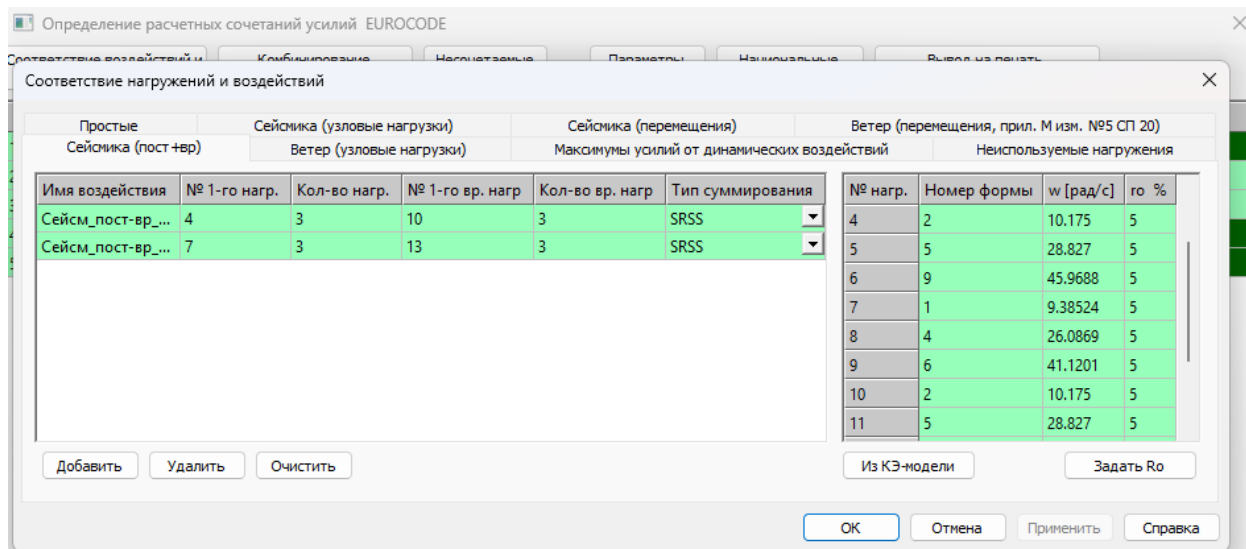
№ формы колебаний	Суммарные значения расчетных сейсмических нагрузок (кН) при воздействии в продольном направлении здания (по оси X)	Суммарные значения расчетных сейсмических нагрузок (кН) при воздействии в поперечном направлении здания (по оси Y)
1	0	1536
2	1603	0
3	0	0
4	0	331
5	332	0
6	0	119
7	0	0
8	0	0
9	110	0

4. Нормативные расчеты конструктивных стальных элементов по нормам Еврокода

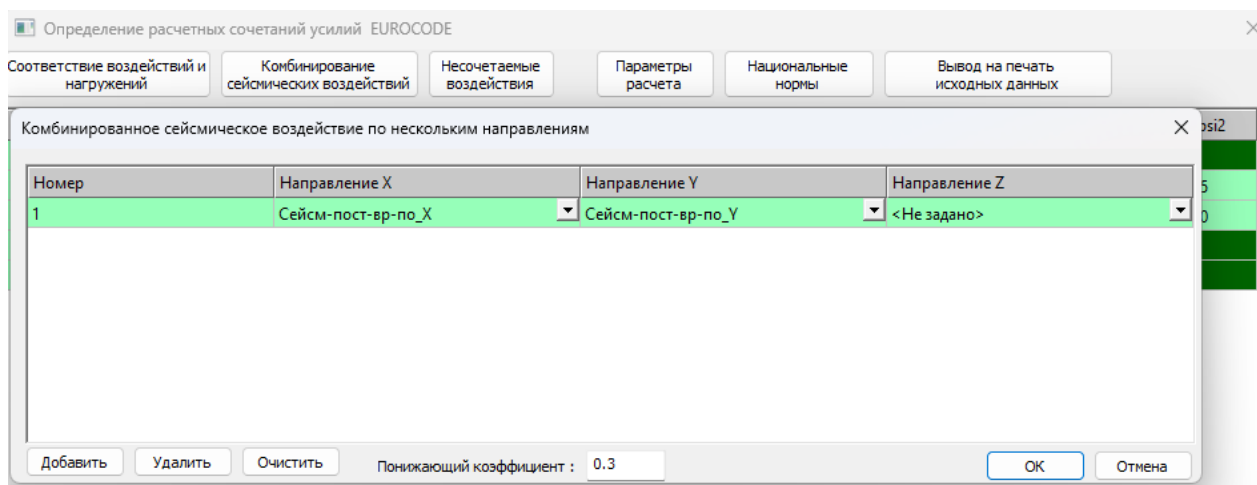
На вкладке «Нормативные расчеты» переходим к «PCU Eurocode».



Задаем совместные поступательные и вращательные сейсмические воздействия по горизонтальным осям в пункте «Соответствие воздействий и нагрузжений» на вкладке «Сейсмика (пост+вр)».



Также при расчетах по нормам Еврокода задаем комбинированное сейсмическое воздействие в пункте «Комбинирование сейсмических воздействий».



После устанавливаем коэффициенты для нагрузений и выполняем расчет PCY.

Определение расчетных сочетаний усилий EUROCODE

Соответствие воздействий и нагрузений | Комбинирование сейсмических воздействий | Несочетаемые воздействия | Параметры расчета | Национальные нормы | Вывод на печать исходных данных

№	Имя	Тип	Источник	+/-	Нагрузки	gamma	gamma_inf	Gsup/Ginf	ksi	psi0	psi1	psi2
1	Соб_вес+пост	Постоянное	Простое	☐	1	1.35	1.00	1.00	0.85			
2	Перем_перекрытия	Переменное	Простое	☐	2	1.50				0.70	0.50	0.35
3	Перем_снег	Переменное	Простое	☐	3	1.50				0.70	0.50	0.30
4	Сейсм-пост-вр-по_X	Особое	Сеймика	☒	4 - 6, 10 - 12	1.00						
5	Сейсм-пост-вр-по_Y	Особое	Сеймика	☒	7 - 9, 13 - 15	1.00						

☐ Учитывать этапы возведения | Изменить этапы

Задать коэффициенты по умолчанию | Количество сечений: 3 | OK | Отмена | Помощь

Далее переходим к пункту «Конструктивные стальные элементы» - «Задание данных».

СтаДиКон 2026 | Старт | Фрагмент | Элементы | Связи | Нагрузки | Модель | Расчет | Прикладные расчеты | Результаты | Нормативные расчеты

PCY СНиП* | PCY Eurocode (комбинации) | PCY (стержни) | Обобщенные усилия | Результаты | PCY (реакции) | Стержни | Плиты, стены, Оболочки (конечные элементы)* | Армирование | Конструктивные стальные элементы* | Сталь (конечные элементы)* | Экспорт PCY | Кон

Задание данных | Результаты расчета | Стесненное кручение | Балка переменной высоты

Задаем по позициям группы конструктивных элементов и при необходимости редактируем их в соответствии с задаваемыми сечениями.

Констр. элементы - металл

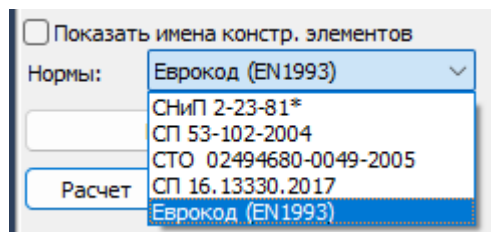
Все группы

- Создать группу
- Удалить все
- Задать по позициям
- Задать по позициям (с учётом этажей)
- Экспорт в Tekla (ascii)
- Свойства групп
- Печать исх. данных групп
- Вывод спецификации
- Передача материалов в КЭ-модель
- Импорт

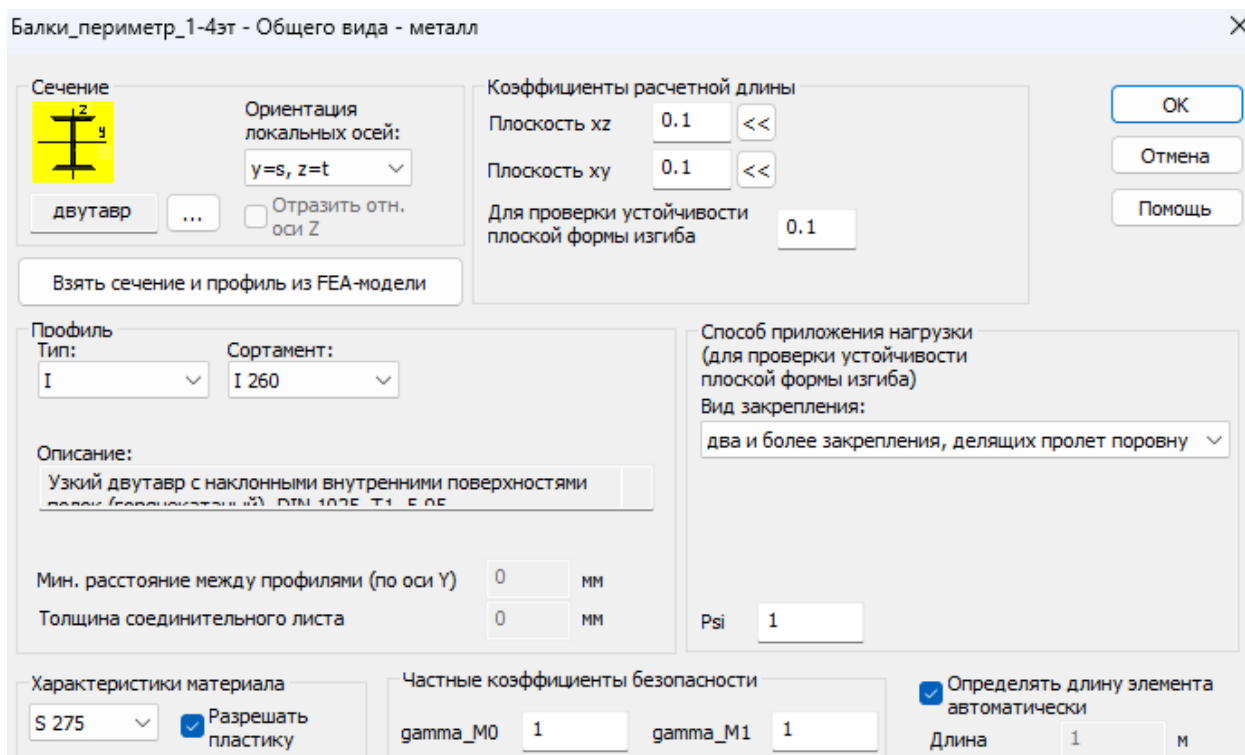
Констр. элементы - металл

- Все группы
- Балки_периметр_1-4эт
- Балки_внутр_1-4эт
- Балки_периметр_5эт
- Балки_внутр_5эт
- Колонны_связей_1-2эт
- Колонны_связей_3-5эт
- Колонны_внутр_1-2эт
- Колонны_внутр_3-5эт
- Колонны_угл_1-5эт
- Связи_1эт
- Связи_2-3эт
- Связи_4эт
- Связи_5эт

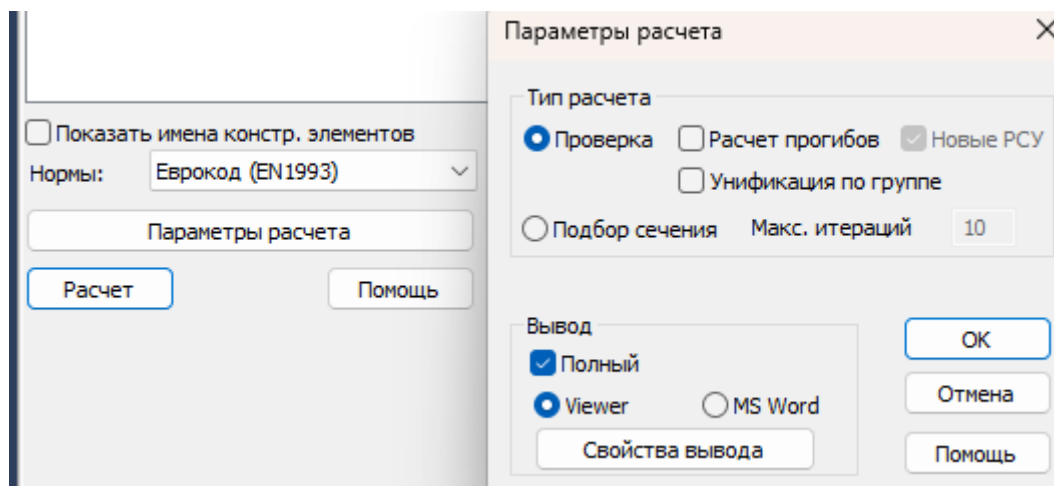
Устанавливаем нормы «Еврокод (EN1993)».



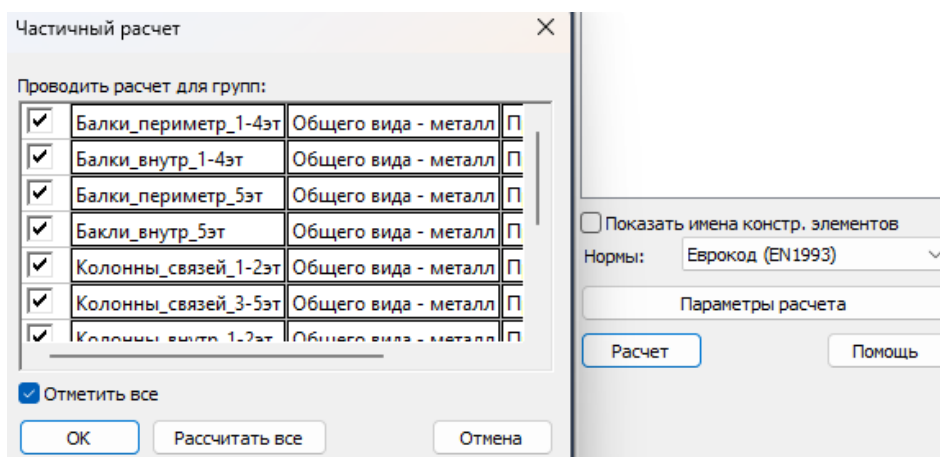
Далее после нажатия ПКМ по группе выбираем «Свойства». Таким образом каждой группе задаем материалы и сечения. Коэффициенты расчетных длин для балок и связей приняты равными 0.1; для колонн равными 0.5 в плоскостях xz/xу и 0.1 для проверки устойчивости плоской формы изгиба.



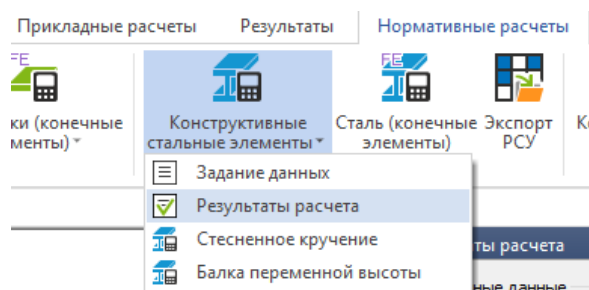
Устанавливаем следующие параметры расчета.



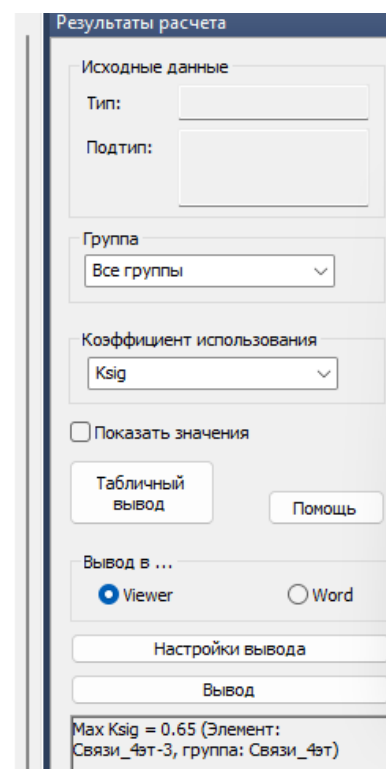
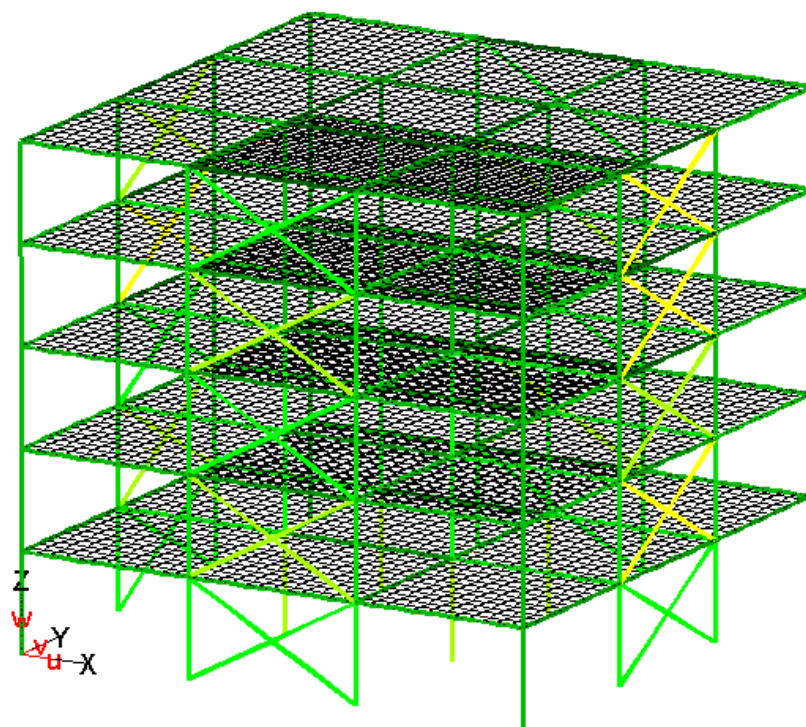
После выбираем «Расчет» и запускаем расчет всех конструктивных групп.



Результаты можно просмотреть, выбрав «Конструктивные стальные элементы» - «Результаты расчета».

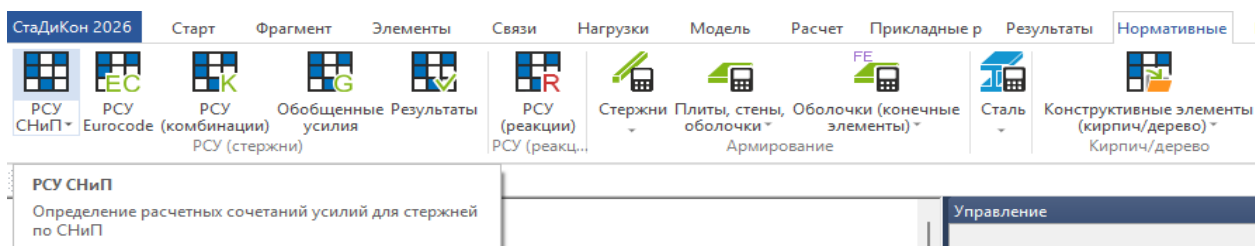


По результатам расчета условие прочности выполняется для всех групп конструктивных стальных элементов без надобности подбора сечений.

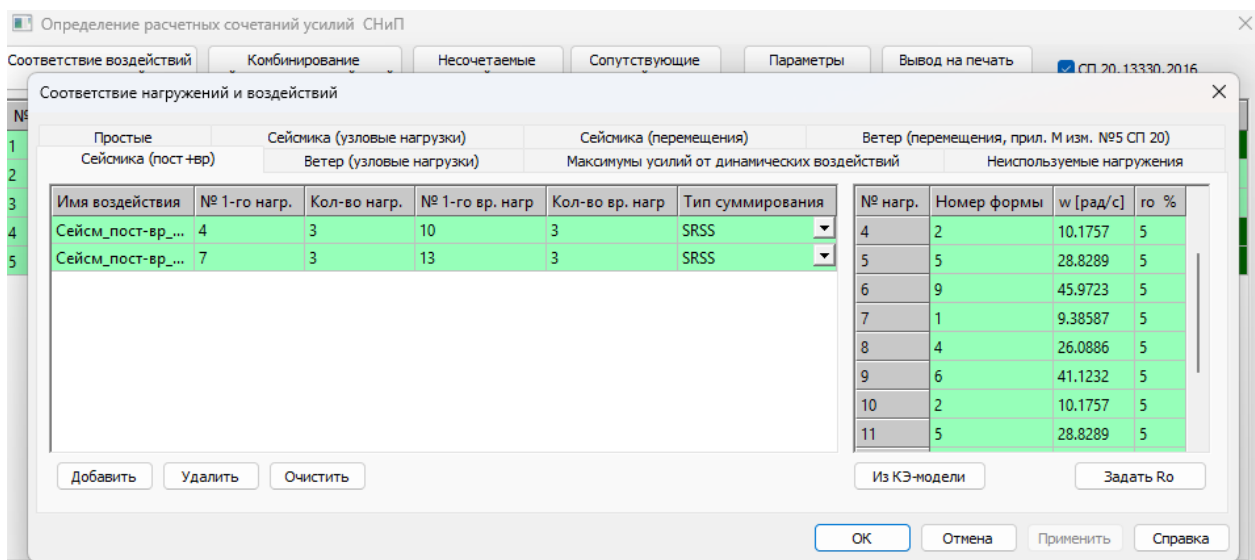


5. Нормативные расчеты конструктивных стальных элементов по нормам СП

На вкладке «Нормативные расчеты» переходим к «РСУ СНИП».

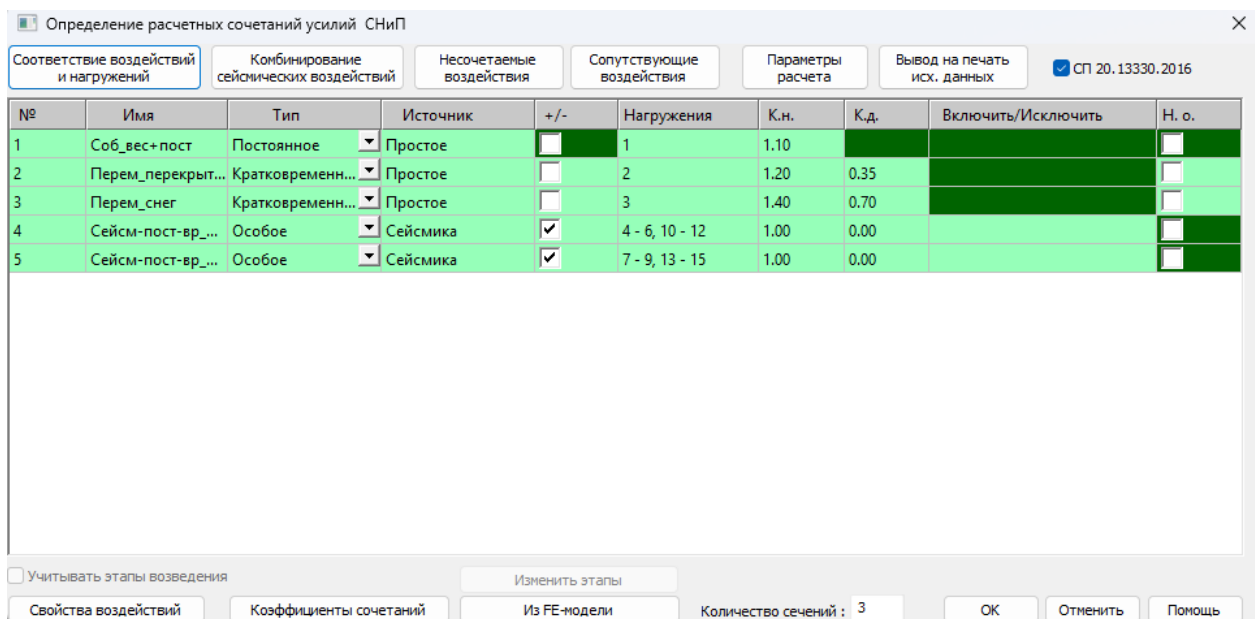


Задаем совместные поступательные и вращательные сейсмические воздействия по горизонтальным осям в пункте «Соответствие воздействий и нагрузжений» на вкладке «Сейсмика (пост+вр)».

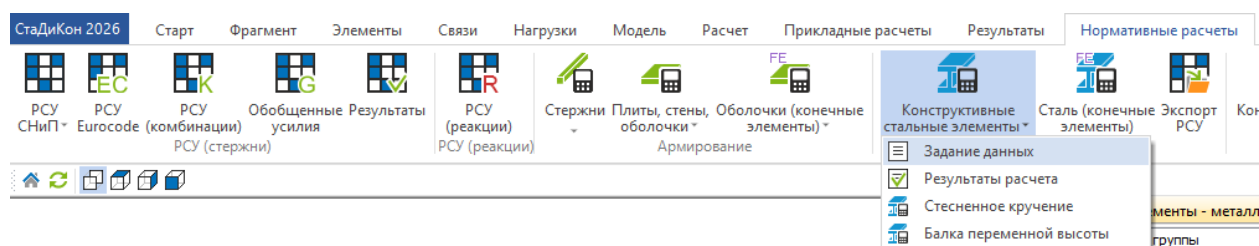


При расчетах по нормам СП комбинированное сейсмическое воздействие не задаем.

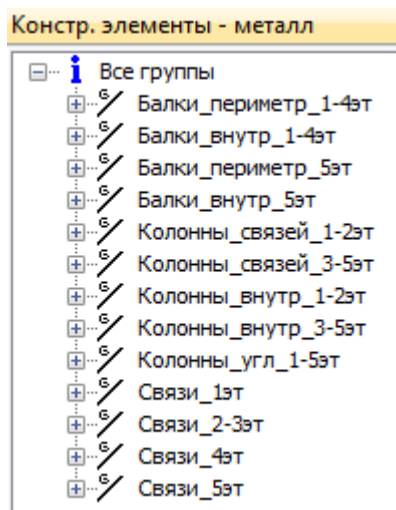
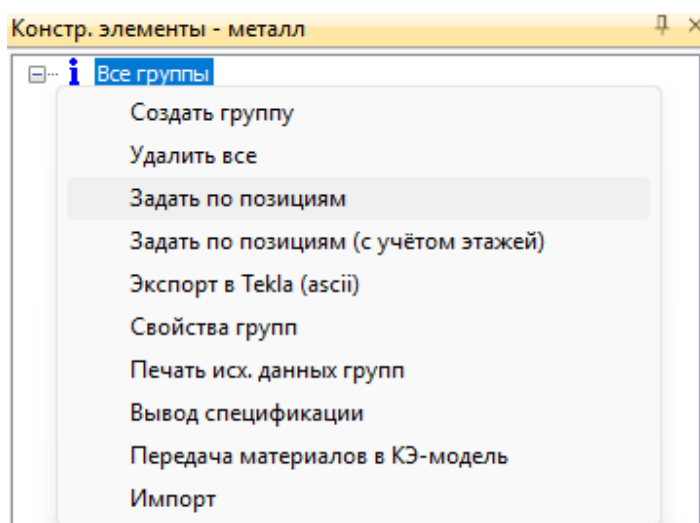
После устанавливаем коэффициенты для нагрузжений и выполняем расчет РСУ.



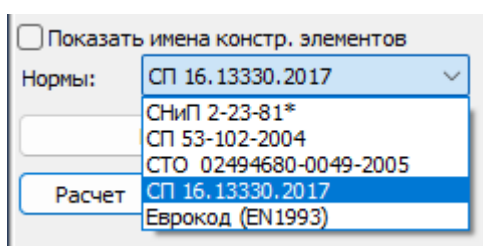
Далее переходим к пункту «**Конструктивные стальные элементы**» - «**Задание данных**».



Задаем по позициям группы конструктивных элементов и при необходимости редактируем их в соответствии с задаваемыми сечениями.



Устанавливаем нормы «СП 16.13330.2017».



Далее после нажатия ПКМ по группе выбираем «Свойства». Таким образом каждой группе задаем материалы и сечения. Коэффициенты расчетных длин для балок и связей приняты равными 0.1; для колонн равными 0.5 в плоскостях xz/xу и 0.1 для проверки устойчивости плоской формы изгиба.

Балки_периметр_1-4эт - Общего вида - металл

Сечение



Ориентация локальных осей:
y=s, z=t

двутавр ... ☐ Отобразить отн. оси Z

Взять сечение и профиль из FEA-модели

Коэффициенты расчетной длины

Плоскость xz 0.1 <<

Плоскость xy 0.1 <<

Для проверки устойчивости плоской формы изгиба 0.1

Профиль

Тип: I

Сортамент: I 260

☐ Только российские профили

Описание:
Узкий двутавр с наклонными внутренними поверхностями (вариант 1) DTM 1025 T1 5.05

Мин. расстояние между профилями (по оси Y) 0 мм

Толщина соединительного листа 0 мм

☐ Эксплуатация при темп. ниже -40 С (Таб. 6 СП 14.13330.2018)

Характеристики материала
С 275

Коэффициент условий работы
gamma_c 1

☐ При растяжении 1

☒ Разрешать пластику

Определять длину элемента автоматически

Длина 1 м

Способ приложения нагрузки (для проверки устойчивости плоской формы изгиба)
Вид закрепления:
два и более закрепления, делящих пролет поровну

Предельная гибкость:

180-60a << - сжатие

400 << - растяжение

Примечание (п. 1 таблицы 33):
Не применять

OK Отмена Помощь

Устанавливаем следующие параметры расчета.

☐ Показывать имена констр. элементов

Нормы: СП 16.13330.2017

Параметры расчета

Расчет Помощь

Параметры расчета

Тип расчета

☒ Проверка ☐ Расчет прогибов ☒ Новые РСУ

☐ Унификация по группе

☐ Подбор сечения Макс. итераций 10

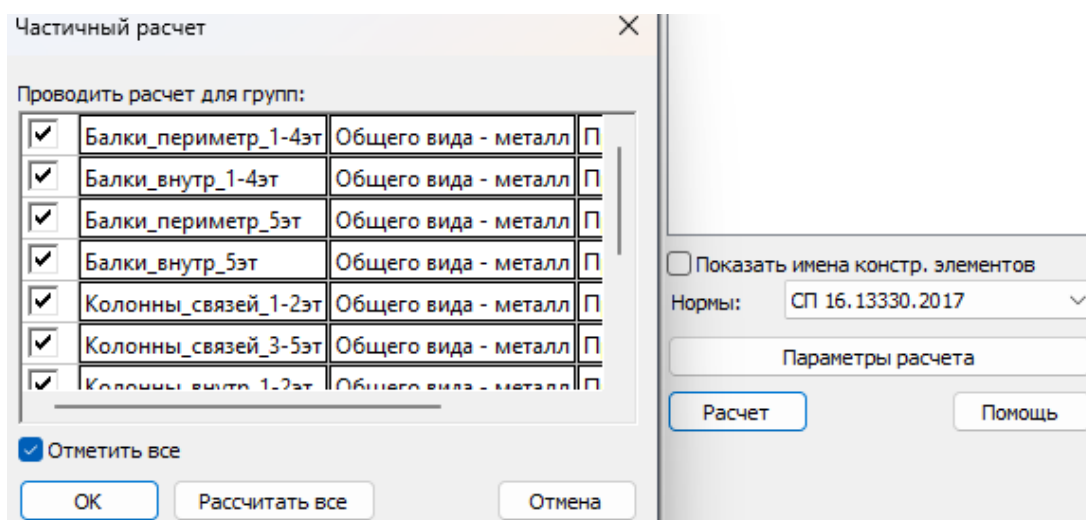
Вывод

☒ Полный ☐ MS Word

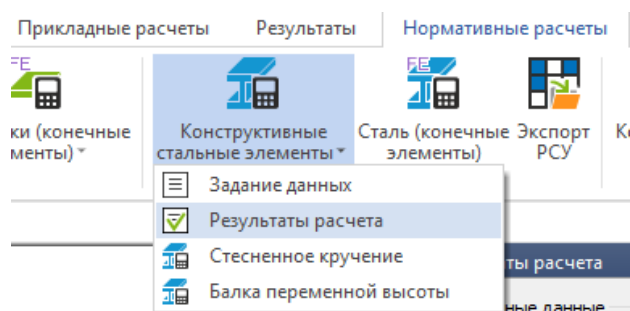
Свойства вывода

OK Отмена Помощь

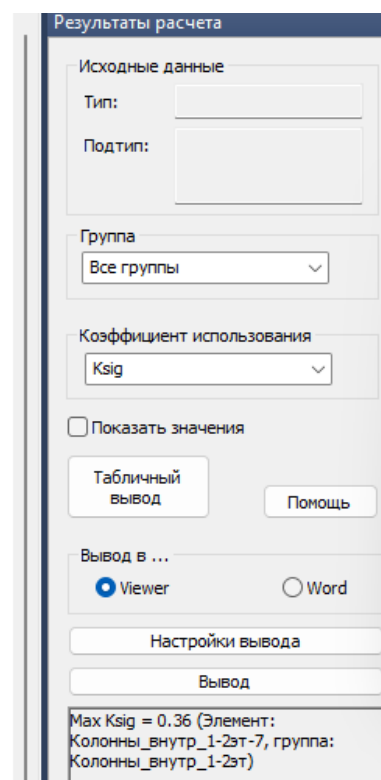
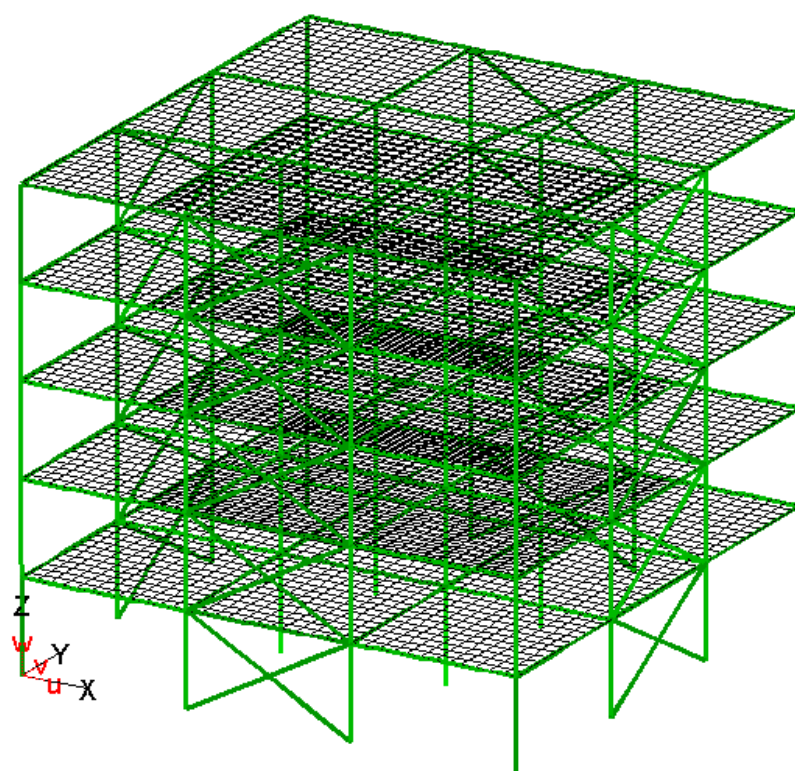
После выбираем «Расчет» и запускаем расчет всех конструктивных групп.



Результаты можно просмотреть, выбрав «Конструктивные стальные элементы» - «Результаты расчета».



Согласно результатам, условие прочности выполняется для всех групп конструктивных стальных элементов без надобности подбора сечений.



6. Сравнение результатов нормативных расчетов

Таблица 6.1 – Сравнение максимального значения коэффициента использования сечения по условиям прочности.

Максимальное значение коэффициента	Схема по нормам Еврокода	Схема по нормам СП
K_{sig}	0.65	0.36

K_{sig} – коэффициент использования сечения по условиям прочности на действие продольной силы и изгибающих моментов.