

Пример 3. Расчет стальной фермы из парных уголков

Требуется выполнить статический расчет стальной стропильной фермы из парных уголков Рис. 1.

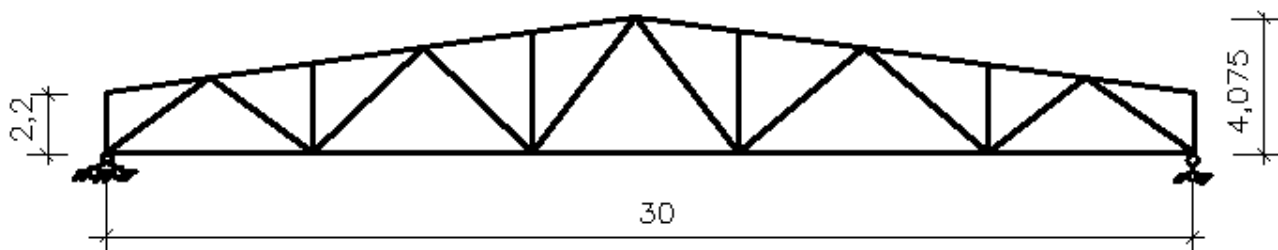


Рис. 1. Расчетная схема фермы

7.1. Исходные данные

Геометрия

Шаг ферм $B = 6$ м

Уклон верхнего пояса $i = 1/8$; $\alpha = 7,125^\circ$; $\cos\alpha = 0,922$.

Длина панелей по верхнему поясу $d_v = 3$ м.

Длина панелей по нижнему поясу $d_n = 6$ м.

Материал - сталь малоуглеродистая обычной прочности класса С245 с расчетным сопротивлением по пределу текучести $R_y = 245$ мПа. (Сталь марки С245, представляет класс низкоуглеродистых металлов. Она предназначена для изготовления широкого ассортимента строительных конструкций. Иногда можно встретить и иную маркировку этого металла СтЗпс5.)

Для упрощения задачи в этом обучающем примере для стержней фермы назначено всего 3 типоразмера профилей:

- стержни **нижнего пояса** и опорные раскосы выполнены из парных равнополочных уголков 100x100x8.
- стержни **верхнего пояса** выполнены из парных неравнополочных уголков 125x80x10.
- стержни **решетки** выполнены из парных равнополочных уголков 75x75x6.

2. Геометрия расчетной модели

Признак схемы – 2.

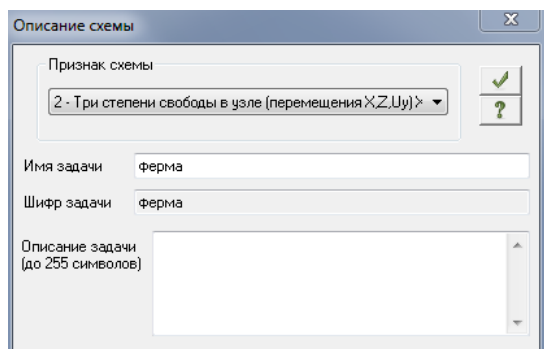


Рис. 2

На панели *Создание – Генерация ферм*

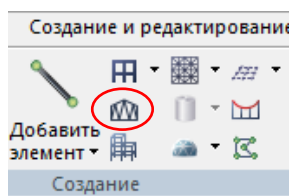


Рис. 3

В окне *Создание плоских ферм* выберем трапецидальную ферму.

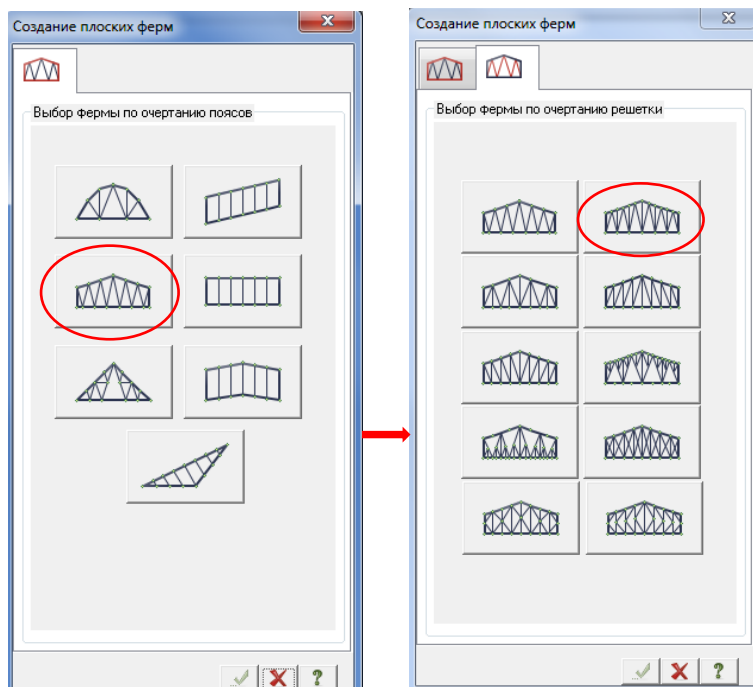


Рис. 4

Однако далее в окне предлагается ввести четное число панелей по нижнему поясу, в то время как в нашей ферме число панелей по нижнему

полюсу равно пяти. Можно поступить, например, следующим образом: ввести параметры фермы с пролетом 36 м, то есть назначить:

$$L = 36 \text{ м}; H = 4,45 \text{ м}; K = 6; h = 2,2 \text{ м}, \text{ рис.5.}$$

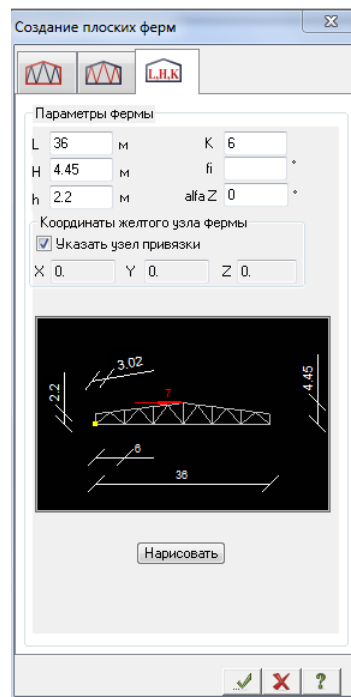


Рис. 5

После ввода параметров нажмите кнопку *Нарисовать* и, убедившись, что схема верна, нажмите кнопку *Применить*. Схема помещается в рабочее окно. Через команду *Флаги рисования* укажем отметку номеров узлов (Рис. 6).

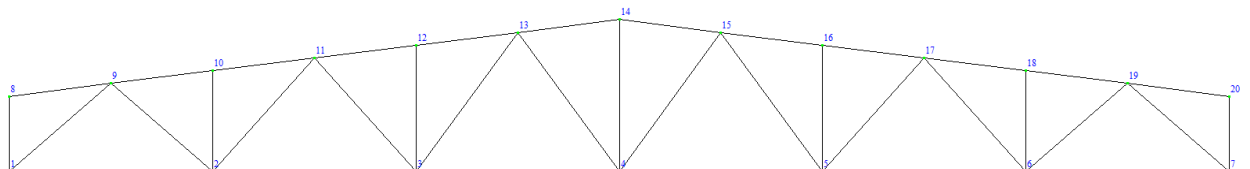


Рис. 6. Геометрическая схема фермы до корректировки

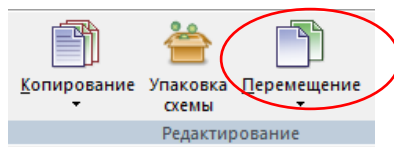
Нам нужно убрать две центральных верхних панели фермы и одну нижнюю и узлы 4 и 14. Выделяем указанные элементы, узлы и удаляем. Получаем схему, изображенную на рис. 7.



Рис. 7. Удаление лишних стержней и узлов

Теперь нужно правую половину схемы переместить влево так, чтобы узлы

13 и 15 совпали. Для этого выделите всю правую половину, и стержни и узлы и с панели *Редактирование* указываем команду *Перемещение*,



или через правую кнопку мыши *Перемещение*. Далее *Перемещение по параметрам*, и задаем перемещение на -6м по оси X.

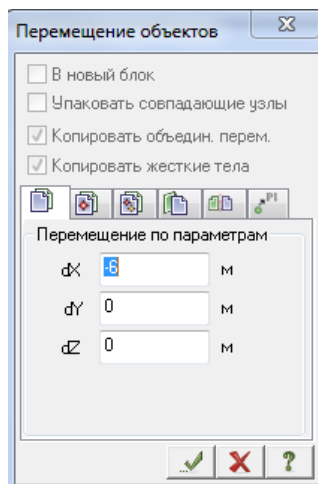
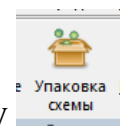


Рис.8

Чтобы сшить совпадающие узлы упакуем полученную схему



В результате получим изображение фермы, рис.9.

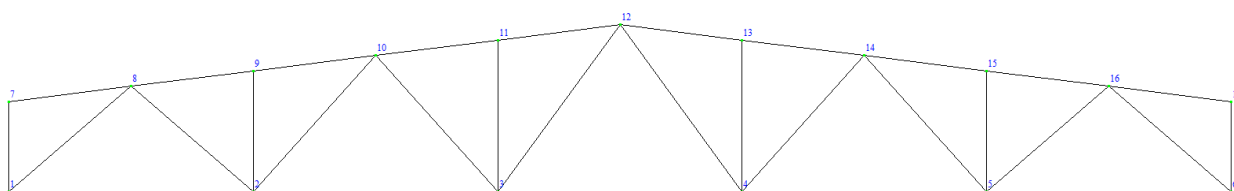


Рис. 9

В схеме недостает среднего нижнего стержня. Добавим его (кнопка *Добавить элемент – Добавить стержень*, соединив стержнем узлы 3 и 4.

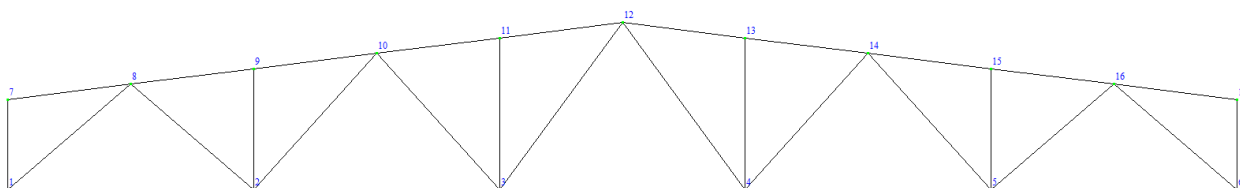


Рис. 10. Геометрическая схема фермы после корректировки
Формирование геометрической схемы закончено.

3. Связи (закрепления)

Левый опорный узел 1 соответствует шарнирно неподвижной опоре, правый 6 – шарнирно подвижной опоре.

Шарнирно-неподвижная опора предполагает наложение связей по X и Z, шарнирно подвижная – по Z.

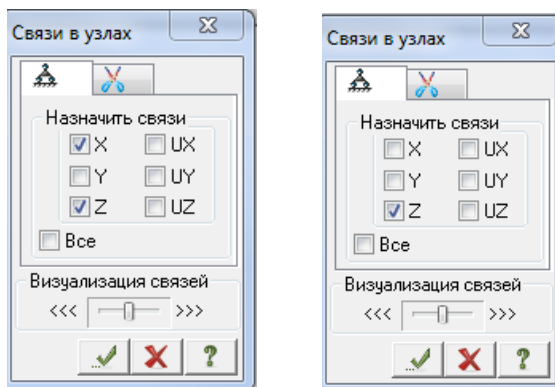
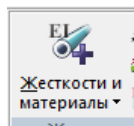


Рис. 11. Закрепление левого опорного и правого.

3.4. Жесткости стержней

Список жесткостей составляется в окне *Жесткости и материалы*,



или через правую кнопку мыши *Создание и назначение жесткостей и материалов*

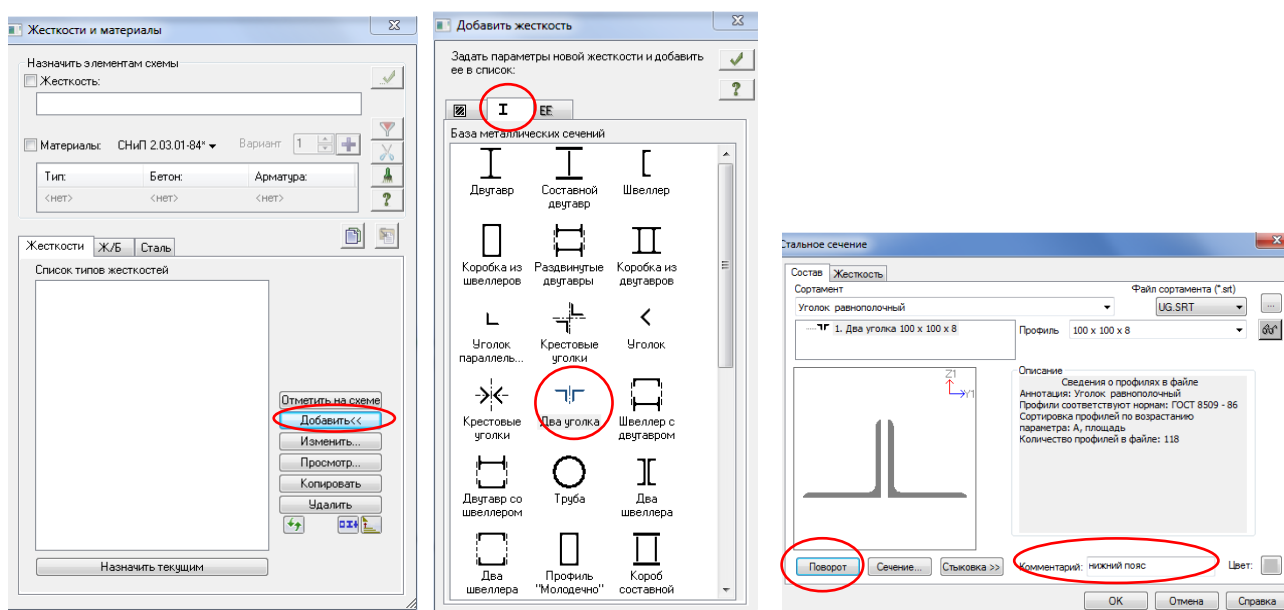


Рис. 12. Последовательность действий по формированию жесткости

В закладке *Стальное сечение* расположение уголков формируем используя клавишу *Поворот*. Не забываем отмечать наименование элемента в комментариях.

Таким же образом добавим в список жесткостей парные уголки 125x80x10 и 75x75x6.

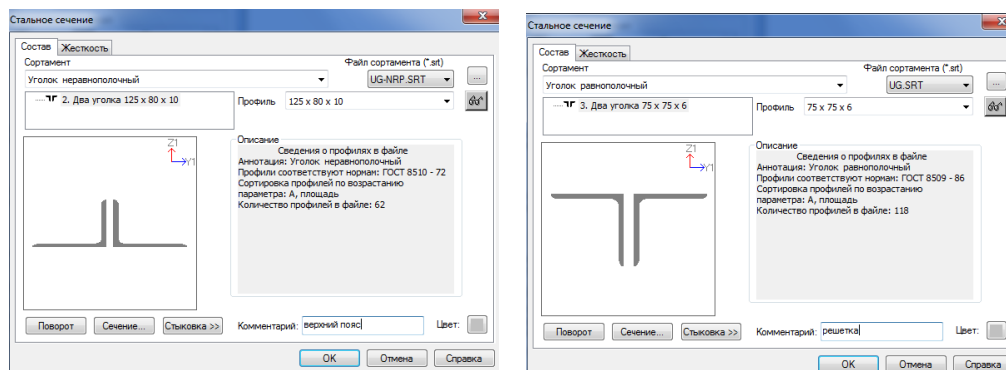


Рис. 13.

Таким образом формируется список жесткостей (рис. 14), осталось только их присвоить.

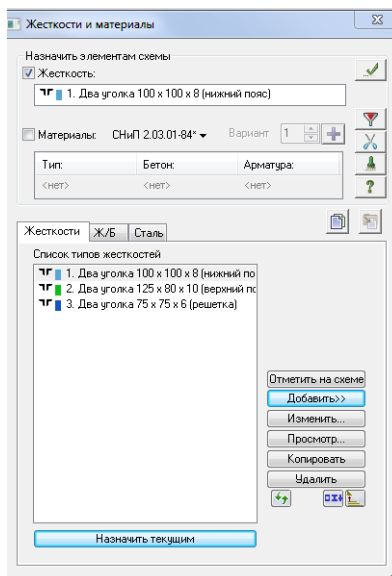



Рис. 14

Двойным щелчком выделяем первую позицию (уголки 100x100x8), не закрывая окна *Жесткости и материалы*, выделяем стержни нижнего пояса фермы и опорные раскосы (стержни окрасятся в красный цвет) и нажимаем кнопку *Применить* .

Для контроля через *Флаги рисования – Показать – Элементы - Типы*

жесткостей, рис. 15



Рис. 15

Выделим вторую строчку списка (уголки 125x80x10), установим, как текущий тип и назначим этот тип стержням верхнего пояса. Третий тип жесткости (уголки 75x75x6) назначим всем остальным стержням решетки.

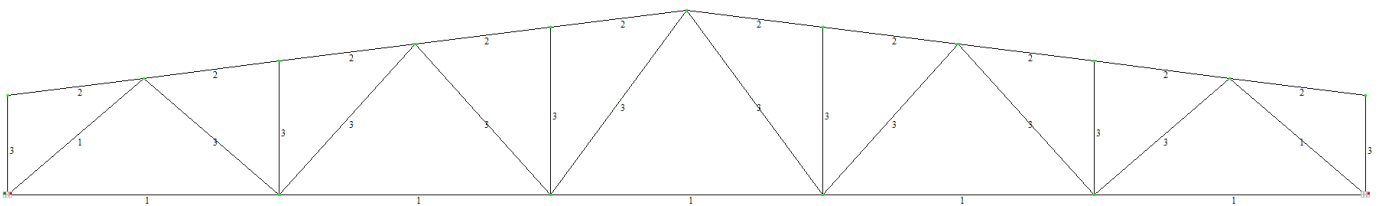


Рис. 16. Расчетная схема фермы с назначенными жесткостями

Жесткости стержней назначены.

3.5. Формирование отдельных загрузений

Перед тем, как вводить нагрузки, установим единицы измерения исходных данных и результатов расчета.

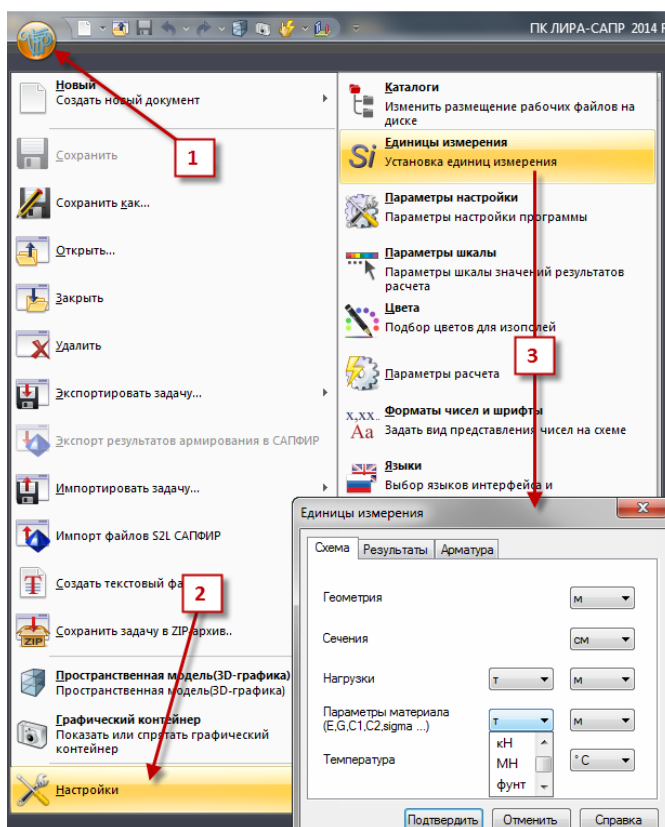


Рис. 17

Сформируем 3 загрузки:

- нормативное значение собственного веса;
- расчетное значение постоянной нагрузки от покрытия;
- расчетное значение временной – снег.

Расчетные значения от постоянной и временной нагрузок прикладываются к узлам верхнего пояса фермы.

Постоянные нагрузки от покрытия

Нормативная нагрузка **от покрытия** на 1 м горизонтальной проекции фермы $q_n = 2,4$ кН/м.

Узловая нормативная нагрузка от покрытия:

- в крайних узлах верхнего пояса $P_n = 2,4 \cdot 1,5 / 0,922 = 3,9$ кН
- в промежуточных узлах верхнего пояса $P_n = 2,4 \cdot 3 / 0,922 = 7,8$ кН.

Узловая расчетная нагрузка от покрытия:

- в крайних узлах верхнего пояса $P_p = 3,9 \cdot 1,2 = 4,68$ кН;
- в промежуточных узлах верхнего пояса $P_p = 7,8 \cdot 1,2 = 9,36$ кН.

Временные нагрузки от снега

Снеговой район строительства – IV.

Нормативная нагрузка от снега на 1 м горизонтальной проекции покрытия

$$S_n = 2 \text{ кПа} \cdot \frac{6}{0,922} = 13 \text{ кН/м.}$$

Узловая нормативная нагрузка от снега:

- в крайних узлах верхнего пояса $P_n = 13 \cdot 1,5 / 0,922 = 21,15 \text{ кН}$;
- в промежуточных узлах верхнего пояса $P_n = 13 \cdot 3 / 0,922 = 42,3 \text{ кН}$.

Узловая расчетная нагрузка от снега:

- в крайних узлах верхнего пояса $P_p = 21,15 \cdot 1,4 = 29,6 \text{ кН}$;
- в промежуточных узлах верхнего пояса $P_p = 42,3 \cdot 1,4 = 59,2 \text{ кН}$.

Оформим *Редактор загрузений* , рис.18.

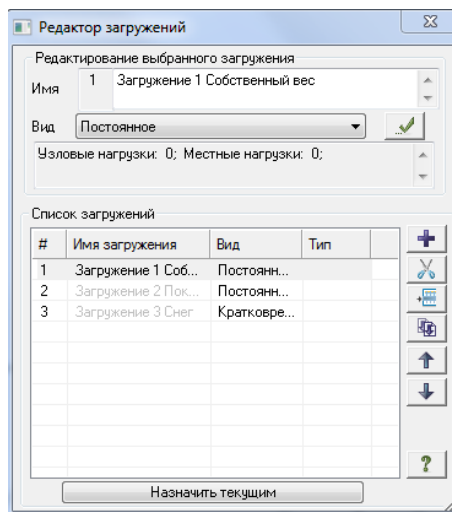


Рис. 18

Назначаем текущим первое загрузение, активизируем команду *Добавить*

собственный вес , подтверждаем действие (*Применить*).

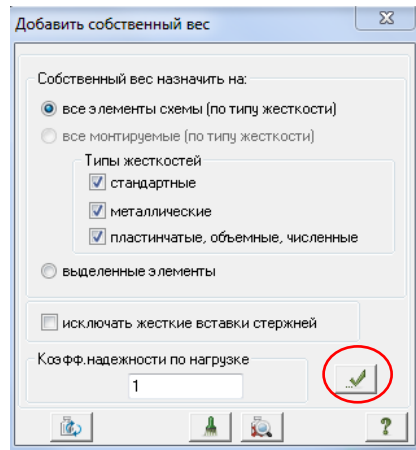


Рис. 19

Загрузка 1 Собственный вес

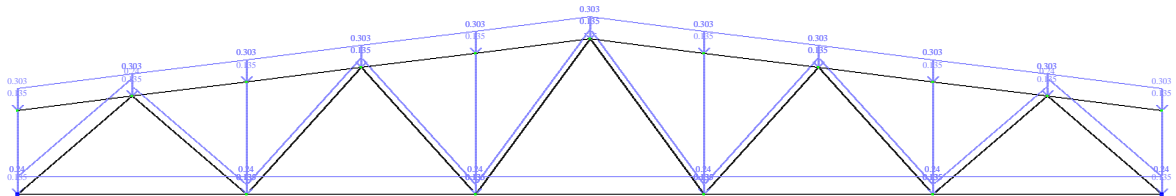


Рис. 20. Расчетная схема фермы, загрузка 1.

Меняем номер загрузений на второй, делаем его текущим, выделяем соответствующие узлы верхнего пояса и назначаем нагрузки, рис.21.

Загрузка 2 Покрытие

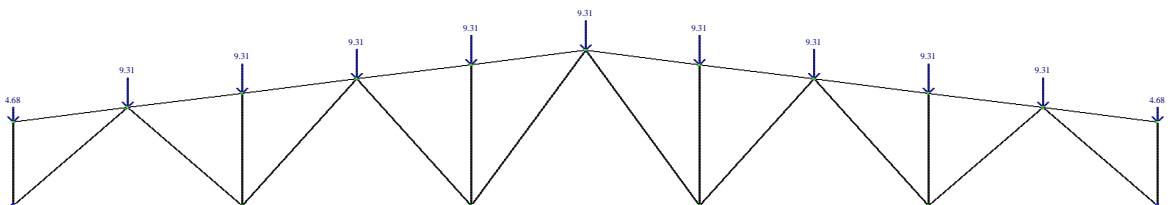


Рис. 21. Расчетная схема фермы, загрузка 2.

Аналогичные действия выполняем при назначении снеговой нагрузки, рис. 22.

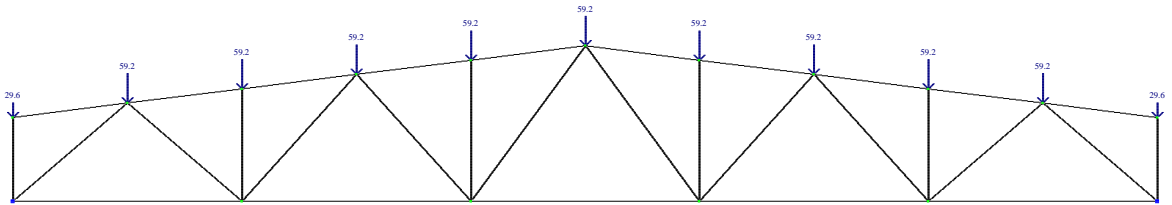


Рис. 22. Расчетная схема фермы, загрузка 3.

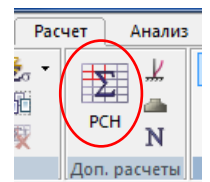
Формирование отдельных загрузений закончено.

Расчет фермы на отдельные загрузения выполняется при нажатии кнопок *Расчет – Выполнить расчет*. Однако нас интересуют результаты расчета не на отдельные загрузения, а на их сочетания.

3.6. Формирование расчетных сочетаний нагрузок (РСН)

Расчетные сочетания нагрузок формируются в режиме результатов расчета после расчета на отдельные загрузения. Окно «Расчетные сочетания

нагрузок» выводится на экран при нажатии кнопки *РСН*



Сформируем два РСН.

РСН 1 – для расчета на прочность и устойчивость, по 1й группе предельных состояний, нагрузки должны быть расчетными (оцениваем усилия в элементах фермы):

$$1 \text{ загрузка} \times \gamma_f + 2 \text{ загрузка} \times \gamma_f + 3 \text{ загрузка} \times \gamma_f$$

Коэффициенты надежности по нагрузке γ_f принимаем в соответствии с табл.

7.1. СП 20.13330.2016, для собственного веса $\gamma_f = 1,05$; для остальных $\gamma_f = 1$, т.к. они уже приняты расчетными.

РСН 2 – для расчета на жесткость, по 2й группе предельных состояний (оцениваем перемещение узлов):

1 загрузка $\times \gamma_f$ + 2 загрузка $\times \gamma_f$ + 3 загрузка $\times \gamma_f$

Для первого нагружения $\gamma_f=1$; для второго - $\gamma_f=1/1,2=0,83$; для третьего - $\gamma_f=1/1,4=0,7$.

Вид окна *Расчетные сочетания нагрузок* с занесенными в него коэффициентами показан на Рис. Нажимаем кнопку *Сохранить данные* в этом окне.

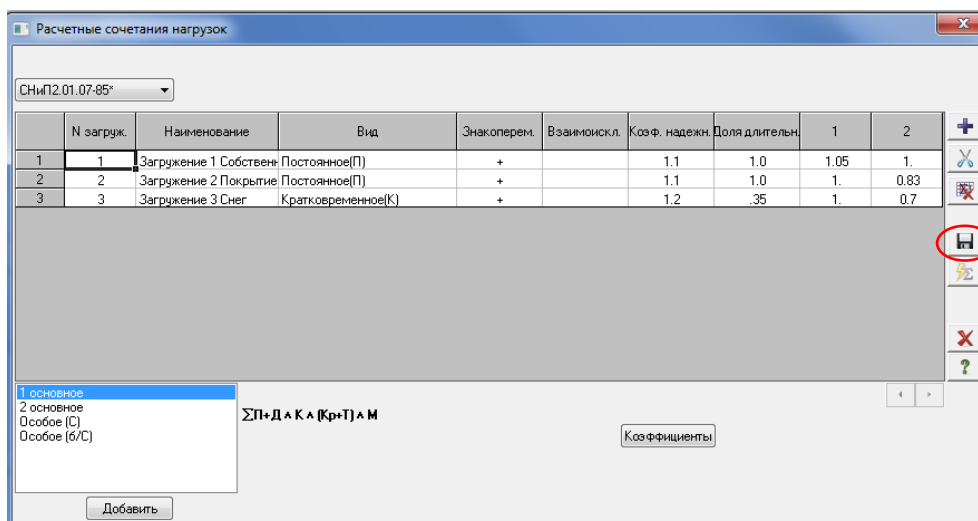



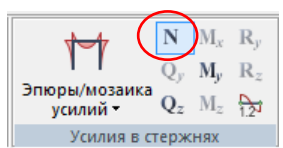
Рис. 23.

Далее *Выполнить расчет* и подтвердить команду *Пересчитать задачу*. Расчет по РСН выполнен.

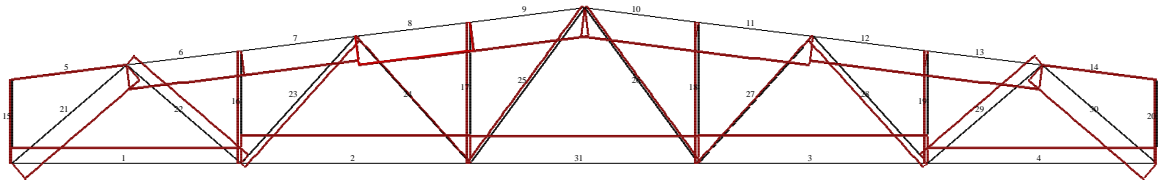
3.7. Вывод и анализ результатов расчета

В режиме *Анализ* нажмем на кнопку *Исходная схема* , далее -

Перейти к анализу результатов по РСН , далее -



Предварительно через команду *Флаги рисования* подтверждаем визуализацию номеров элементов.



Минимальное усилие -697,726
Максимальное усилие 673,587

Рис. 24. Эпюры продольных усилий от 1 РСН

Красным цветом выделен стержень с наибольшим усилием. Также величину и знак усилий можно оценить по *Мозаике усилий в стержнях*,

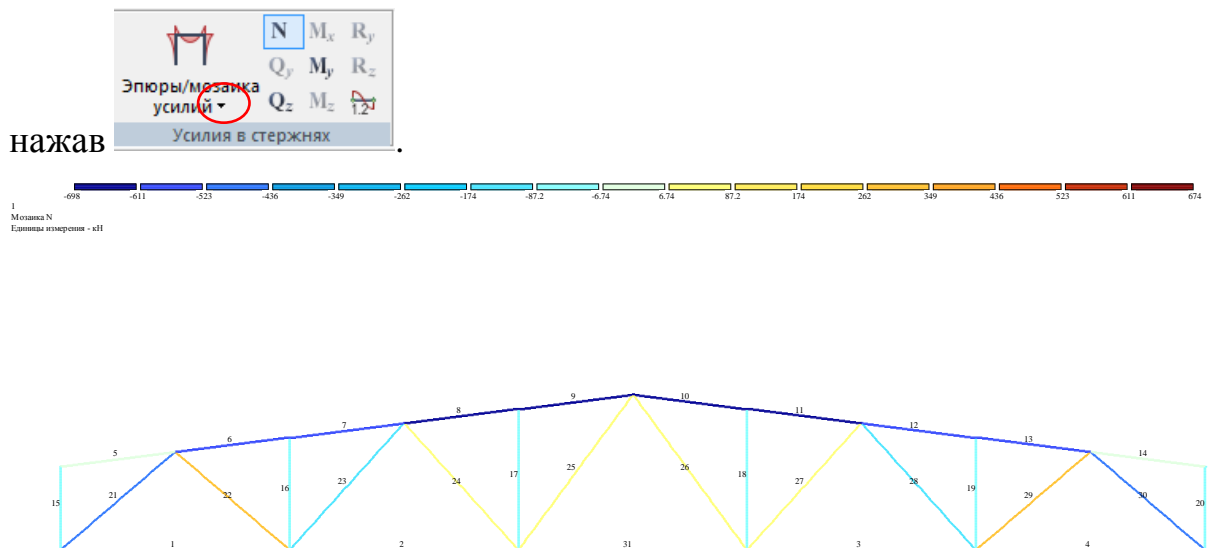
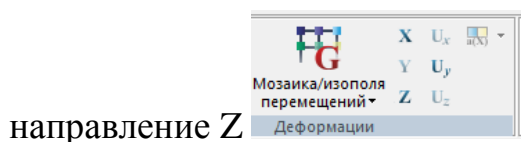


Рис. 25. Мозаика продольных усилий от 1 РСН

Для оценки перемещений узлов меняем номер РСН на второй



Повторно нажимаем (как бы выталкиваем клавишу) клавишу усилий с которой работали и изображение эпюры или мозаики пропадает. Через *Флаги рисования* даем визуализацию только номеров узлов, активизируем команду *Мозаика перемещений*, указываем



направление Z

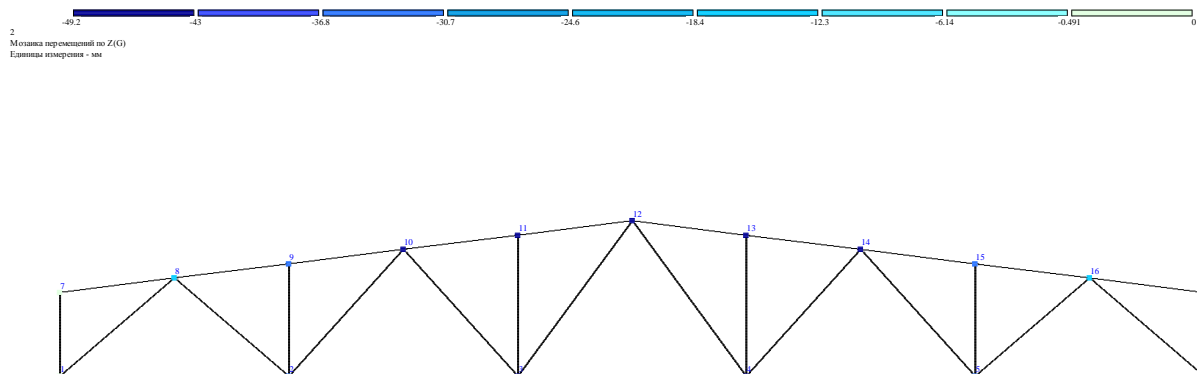


Рис. 26. Мозаика перемещений узлов в направлении Z от второго РСН

Максимальный прогиб – в узле 12: $f_{\max} = 49,2$ мм, что меньше допускаемого прогиба $[f] = 30000/250 = 120$ мм. (Табл. Д.1 СП 20.13330.2016)
Следовательно, жесткость фермы обеспечена.

Можно также вывести на экран интерактивные таблицы со всеми видами информации, нажав на правую кнопку мыши или на панели *Документация* - кнопку *Интерактивные таблицы*.

На рис. 7.15 показана таблица внутренних усилий в стержнях фермы (для половины фермы).

№ элем	№ сечен	Усилия								Тип элем	№ РСН	Составл
		N	Mk	Mu	Qz	Mz	Qu	Ry	Rz			
1	1	372.667	0.000	-0.918	0.900	0.000	0.000	0.000	0.000	10	1	-
1	2	372.667	0.000	-0.055	-0.612	0.000	0.000	0.000	0.000	10	1	-
2	1	673.587	0.000	-0.410	0.768	0.000	0.000	0.000	0.000	10	1	-
2	2	673.587	0.000	-0.340	-0.745	0.000	0.000	0.000	0.000	10	1	-
5	1	-0.790	0.000	-0.706	0.787	0.000	0.000	0.000	0.000	10	1	-
5	2	-0.671	0.000	0.230	-0.168	0.000	0.000	0.000	0.000	10	1	-
6	1	-583.224	0.000	-0.259	0.667	0.000	0.000	0.000	0.000	10	1	-
6	2	-583.104	0.000	0.312	-0.289	0.000	0.000	0.000	0.000	10	1	-
7	1	-583.403	0.000	0.010	0.495	0.000	0.000	0.000	0.000	10	1	-
7	2	-583.284	0.000	0.063	-0.460	0.000	0.000	0.000	0.000	10	1	-
8	1	-697.726	0.000	-0.039	0.568	0.000	0.000	0.000	0.000	10	1	-
8	2	-697.606	0.000	0.234	-0.387	0.000	0.000	0.000	0.000	10	1	-
9	1	-697.655	0.000	0.313	0.208	0.000	0.000	0.000	0.000	10	1	-
9	2	-697.535	0.000	-0.502	-0.747	0.000	0.000	0.000	0.000	10	1	-
15	1	-35.471	0.000	-0.805	0.687	0.000	0.000	0.000	0.000	10	1	-
15	2	-35.159	0.000	0.706	0.687	0.000	0.000	0.000	0.000	10	1	-
16	1	-69.743	0.000	-0.285	0.199	0.000	0.000	0.000	0.000	10	1	-
16	2	-69.325	0.000	0.302	0.199	0.000	0.000	0.000	0.000	10	1	-
17	1	-69.631	0.000	0.017	-0.026	0.000	0.000	0.000	0.000	10	1	-
17	2	-69.106	0.000	-0.079	-0.026	0.000	0.000	0.000	0.000	10	1	-
21	1	-490.421	0.000	0.113	0.240	0.000	0.000	0.000	0.000	10	1	-
21	2	-489.772	0.000	-0.433	-0.516	0.000	0.000	0.000	0.000	10	1	-
22	1	271.580	0.000	0.056	0.165	0.000	0.000	0.000	0.000	10	1	-
22	2	271.214	0.000	-0.135	-0.261	0.000	0.000	0.000	0.000	10	1	-
23	1	-141.671	0.000	-0.064	0.207	0.000	0.000	0.000	0.000	10	1	-
23	2	-141.199	0.000	-0.092	-0.219	0.000	0.000	0.000	0.000	10	1	-
24	1	28.079	0.000	0.010	0.173	0.000	0.000	0.000	0.000	10	1	-
24	2	27.607	0.000	-0.167	-0.252	0.000	0.000	0.000	0.000	10	1	-
25	1	63.230	0.000	-0.069	0.194	0.000	0.000	0.000	0.000	10	1	-
25	2	63.808	0.000	-0.164	-0.232	0.000	0.000	0.000	0.000	10	1	-
31	1	654.599	0.000	-0.421	0.756	0.000	0.000	0.000	0.000	10	1	-
31	2	654.599	0.000	-0.421	-0.756	0.000	0.000	0.000	0.000	10	1	-

Рис. 27. Внутренние усилия в стержнях фермы