

Расчет деформативности конструкции стальной фермы с учетом выделенной доли длительности нагрузки

Н.В. Линьков

Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет

Аннотация: В статье предоставлены результаты расчета стальной фермы с параллельными поясами пролетом 36 м по второй группе предельных состояний с учетом выделенной доли длительности временной снеговой нагрузки. Выполнено сравнение результатов определения вертикальных перемещений узлов конструкции стальной фермы под действием постоянных и временной снеговой нагрузок.

Ключевые слова: ферма, расчетное сочетание нагрузок, модуль упругости, жесткость, доля длительности, прогиб, САПР.

Введение

Ферма – это система прямолинейных стержней, соединенных между собой в узлах и образующих геометрически неизменяемую конструкцию. Фермы экономичнее конструкций балок по расходу стали, но более трудоемки в изготовлении. Эффективность ферм по сравнению со сплошностенчатыми балками возрастает с увеличением пролета конструкции [1-3]. Фермы с параллельными поясами по своему очертанию далеки от эпюры изгибающих моментов и зачастую неэкономичны по показателю расхода стали [4-6], хотя равные длины элементов решетки, единая конструкция узлов, наибольшая повторяемость элементов и деталей, а также возможность их унификации, способствуют индустриализации их изготовления и автоматизации их предварительного проектирования и расчета.

Цель данной работы – оценить деформативность конструкции стальной фермы, как параметра соответствия нормальной эксплуатации конструкции и установить влияние на получаемый расчетный результат выделенной доли длительности нагрузки на конструкцию.

Предметом исследования является напряженно-деформированное состояние конструкции фермы под действием постоянных и временных нагрузок, приложенных в узлы верхнего пояса.

Общие данные расчетной модели фермы

За основу примем стальную ферму с параллельными поясами, треугольной решеткой и стойками из уголков. Общие характеристики конструкции фермы представлены в таблице 1.

Таблица 1

Общие характеристики конструкции фермы

Параметр	Обозначение параметра	Единица измерения	Значение
Пролет фермы	L_{ϕ}	м	36
Высота фермы	H_{ϕ}	м	3.15
Шаг ферм	B_{ϕ}	м	6
Длина панели нижнего пояса фермы	L_n	м	6

Для предварительной оценки деформативности конструкции фермы воспользуемся условием II группы предельных состояний для изгибаемых элементов [7], представив ферму в виде шарнирно-закрепленной балки, нагруженной равномерно-распределенной нагрузкой.

Из условия достижения элементом условия второй группы предельных состояний: $f \leq f_{ult}$, где f – расчетный прогиб конструкции, f_{ult} – предельно-допустимый прогиб, при этом $f_{ult}=(1/200) \times L_{\phi}$, получим величину прогиба $f=36 \times 10^3 \text{ мм} / 200 = 180 \text{ мм}$.

Данное значение прогиба 180 мм установим, как предварительное, которое требуется верифицировать и уточнить в результате расчетов конструкции стальной фермы в программном комплексе Лира САПР [8-10].

Модель фермы создается на основе 1-го признака схемы – две степени свободы в узле: перемещение по оси X, перемещение по оси Y. При моделировании элементов фермы используется 1й тип конечного элемента – конечный элемент плоской фермы.

В качестве граничных условий для конструкции фермы замоделировано шарнирное опирание в нижних опорных узлах. Общий вид конструкции фермы представлен на рисунке 1.

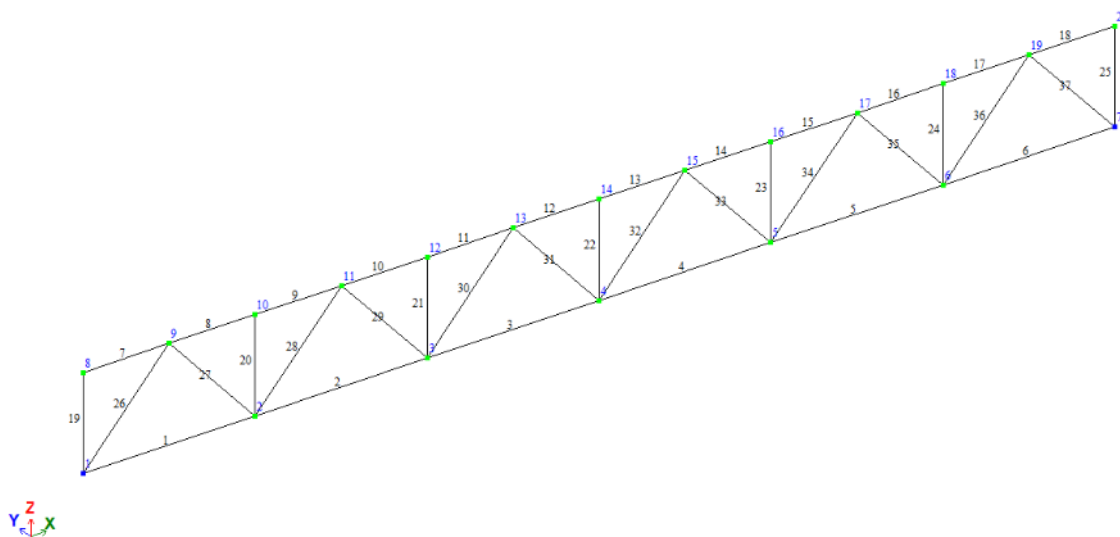


Рисунок 1. Общий вид конструкции фермы

Жесткости элементам фермы назначены по ГОСТ 8509–86 – в виде спаренных и крестовых равнополочных уголков. Сечение основных элементов фермы назначены: верхний пояс – спаренные уголки 120x120x8, нижний пояс – спаренные уголки 110x110x8, опорные элементы решетки – спаренные уголки 100x100x8, рядовые элементы решетки спаренные уголки 80x80x8, центральная стойка – крестовые уголки 50x50x8. Общий вид списка жесткостей, а также общий вид фермы, с указанием вида и ориентации профилей по результатам назначения жесткостей стержневым элементам расчетной схемы представлены на рисунках 2 и 3.

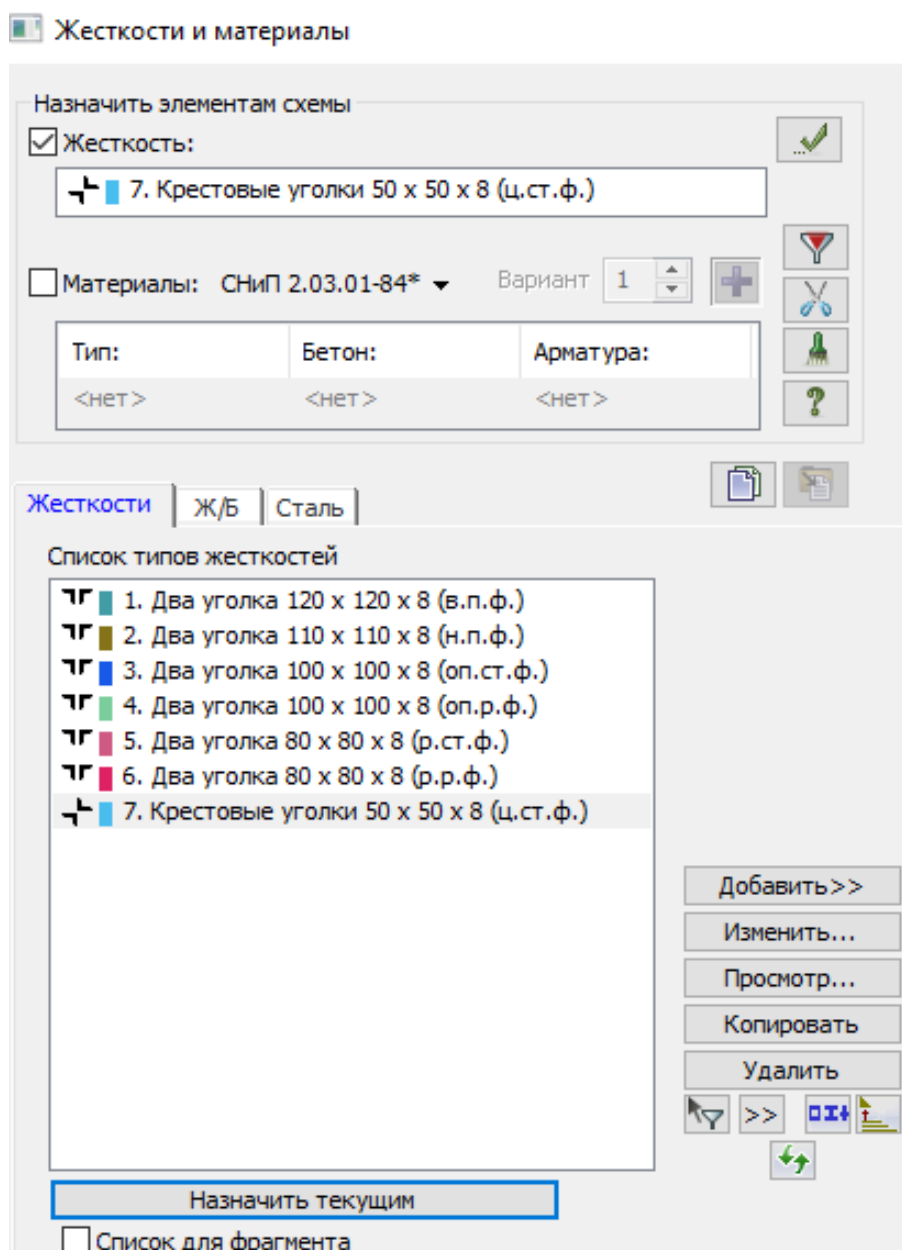


Рисунок 2. Список назначенных жесткостей

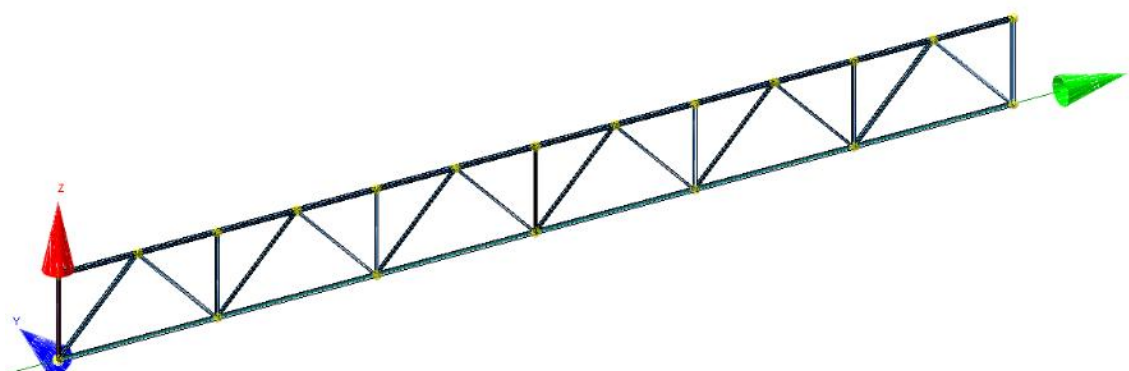


Рисунок 3. Общий вид фермы по результатам назначения жесткостей

Было сформировано 4 загрузки конструкции фермы, в состав которых вошли постоянные и временная нагрузка. При этом к элементам и узлам фермы приложены расчетные значения нагрузок. Общий вид списка загрузений с указанием характеристик коэффициента надежности по нагрузке и долей длительности нагрузок представлен на рисунке 4.

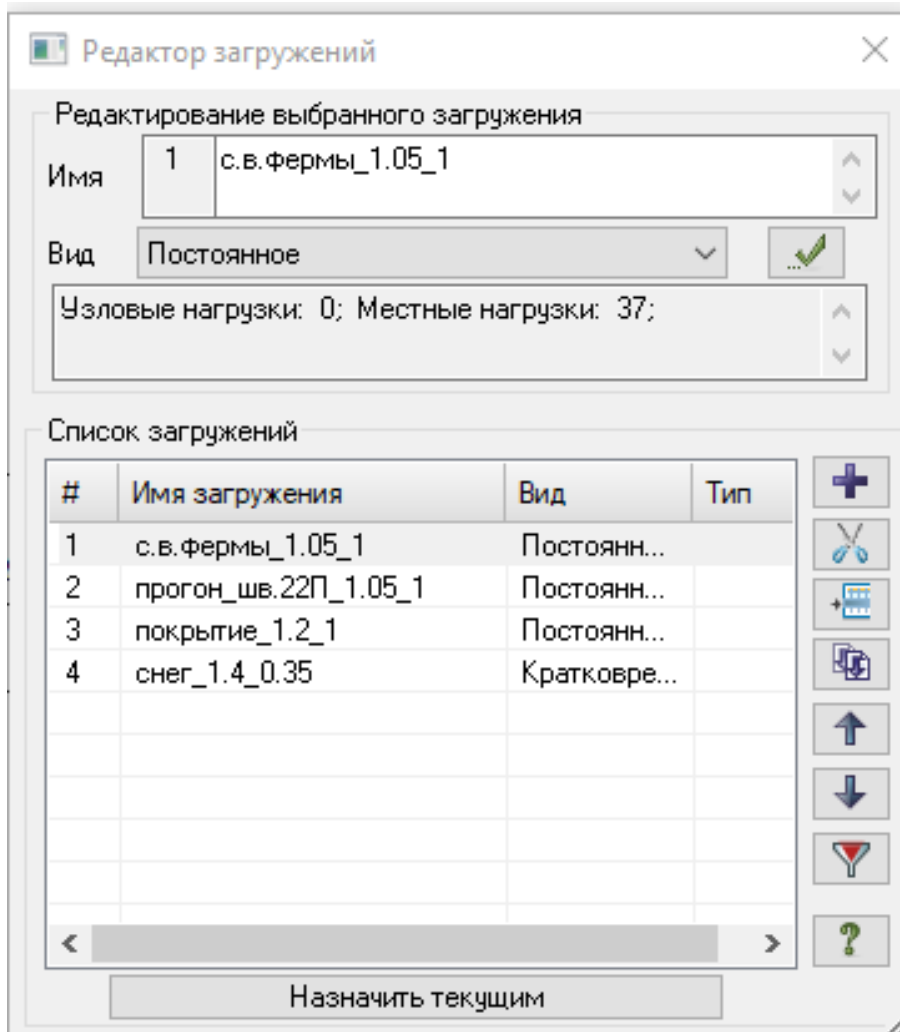


Рисунок 4. Общий вид списка загрузений конструкции фермы

Собственный вес фермы был приложен по типу жесткости в виде равномерно-распределенной нагрузки с коэффициентом надежности для стальных конструкций 1.05. Общий вид загрузения №1 представлен на рисунке 5.

с.в.ферма_1.05_1

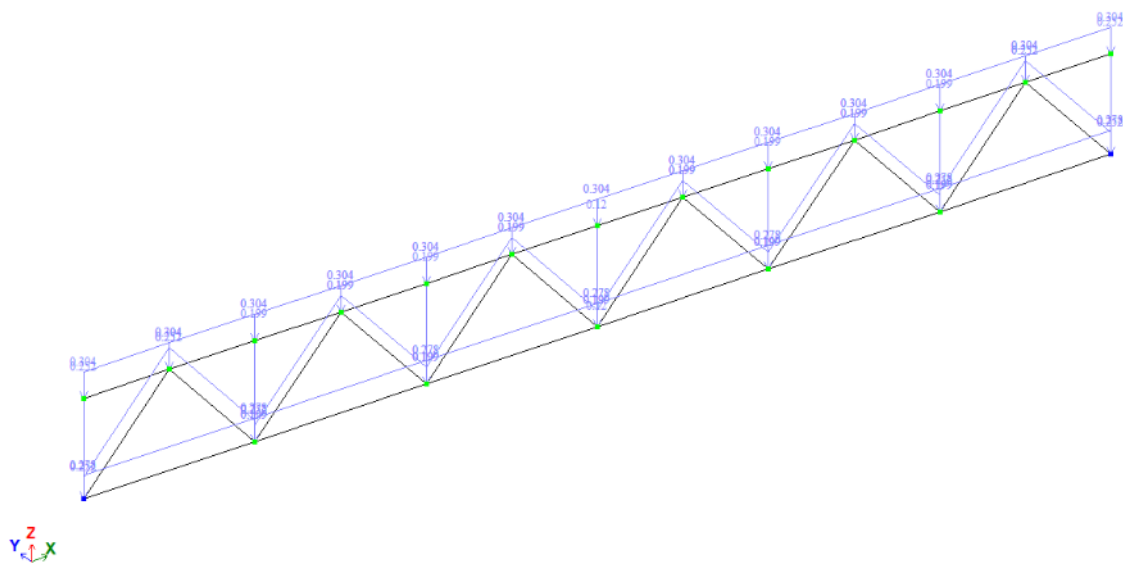


Рисунок 5. Общий вид загрузки №1

Вес прогонов – швеллер с параллельными гранями полок по ГОСТ 8240-72*, через который на фермы передается вес ограждающей части кровли, а также временная нагрузка, был вычислен в виде узловой нагрузки: $P_{прог} = 20.95 \text{ кг/м} \times 1.05 \times 6 \text{ м} = 132 \text{ кг}$. Общий вид загрузки №2 представлен на рисунке 6.

прогон_шв.22П_1.05_1

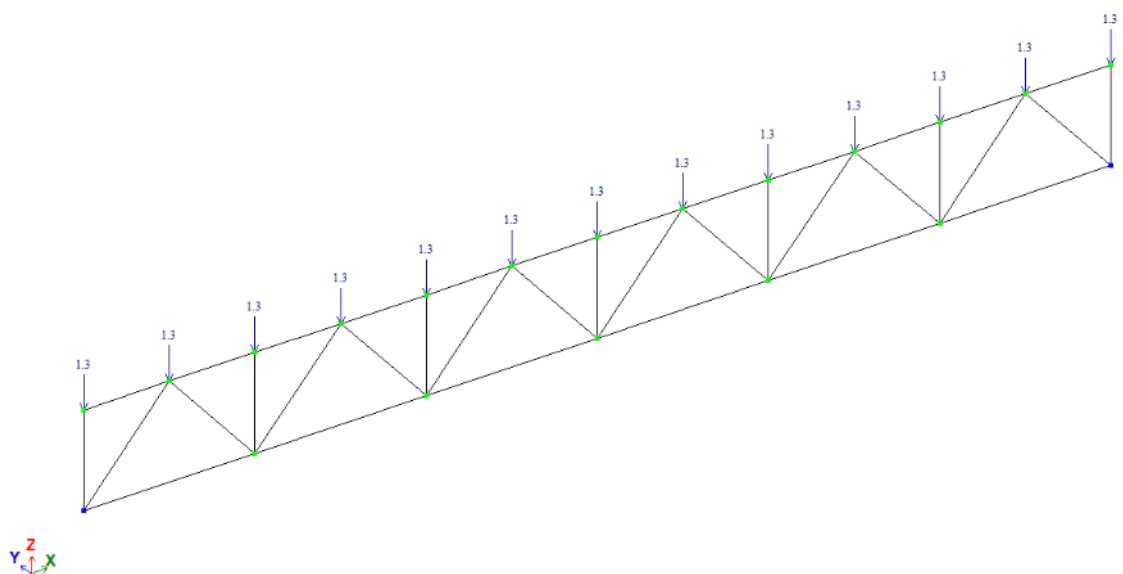


Рисунок 6. Общий вид загрузки №2

Панели покрытия – трехслойная кровельная утепленная панель по ТУ 5284-001-48363367-04 и ГОСТ 32603-2012: материал сердечника – конструкционная каменная вата из волокон базальтовой группы, внешние металлические облицовки – тонколистовая оцинкованная сталь с полимерным покрытием, толщина панели составляет 250 мм, вес панели составляет 44 кг/кв.м. Вес панелей был вычислен в виде нагрузки на торцевые и рядовые узлы верхнего пояса фермы:

$$P_{\text{ряд}} = 44 \text{ кг/кв.м.} \times 1.2 \times 3 \text{ м} \times 6 \text{ м} = 950.4 \text{ кг.}$$

$$P_{\text{торц}} = 44 \text{ кг/кв.м.} \times 1.2 \times 1.5 \text{ м} \times 6 \text{ м} = 475.2 \text{ кг.}$$

Общий вид загрузки №3 представлен на рисунке 7.

покрытие_1,2_1

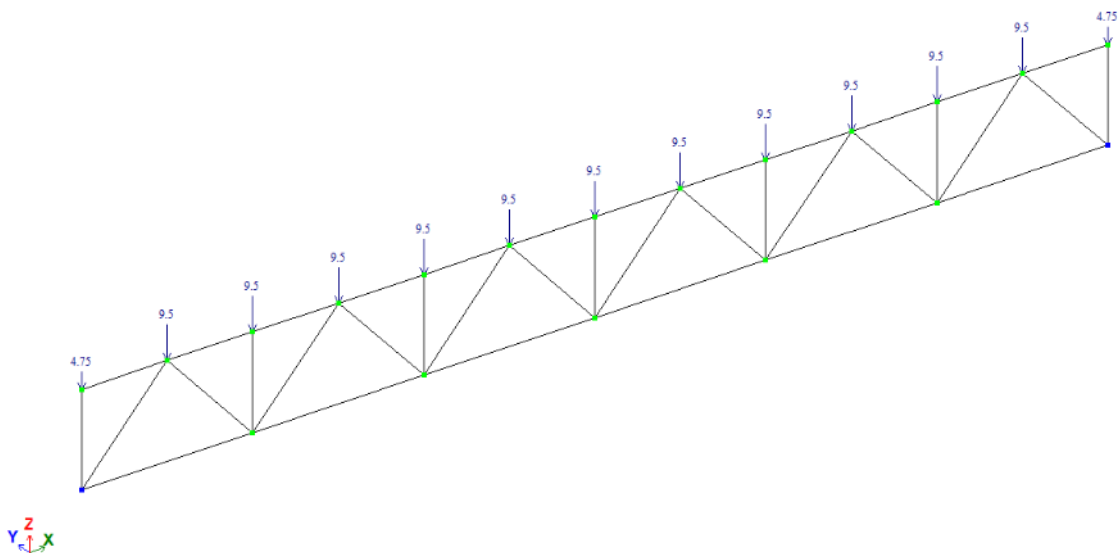


Рисунок 7. Общий вид загрузки №3.

Временная снеговая нагрузка была определена для III снегового района в виде нагрузки на торцевые и рядовые узлы верхнего пояса фермы:

$$P_{\text{ряд}} = 150 \text{ кг/кв.м.} \times 1.4 \times 3 \text{ м} \times 6 \text{ м} = 3780 \text{ кг.}$$

$$P_{\text{торц}} = 150 \text{ кг/кв.м.} \times 1.4 \times 1.5 \text{ м} \times 6 \text{ м} = 1890 \text{ кг.}$$

Общий вид загрузки №4 представлен на рисунке 8.

смет_14_0.35

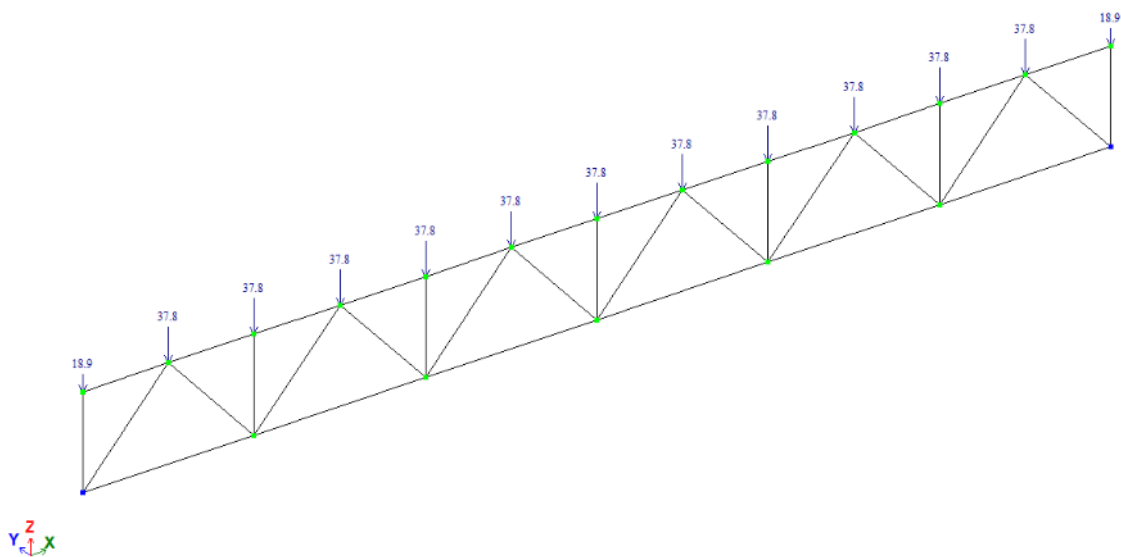


Рисунок 8. Общий вид загрузки №4

Для оценки деформативности конструкции фермы и сравнения с предварительно полученными результатами расчета предельно-допустимого прогиба было сформировано два пользовательских сочетания нормативных нагрузок в рамках создания таблицы РСН: нормативное сочетание №1 без выделенной доли длительности временной снеговой нагрузки и нормативное сочетание №2 с выделением доли длительности временной снеговой нагрузки.

Коэффициенты включения величин нагрузок в загрузениях для постоянных нагрузок составили: $K_S^1 = K_S^2 = 1/1,05 = 0.952$ для стальных конструкций и $K_S^3 = 1/1,2 = 0.833$ для кровельной панели. Коэффициенты включения снеговой нагрузки без выделенной доли длительности составил $K_S^4 = 1/1,4 = 0.7$, когда как с выделением доли длительности значение коэффициента включения составило $K_S^4_{длн} = 1/1,4 \times 0.35 = 0.25$. При этом 1,05; 1,2; 1,4 – коэффициенты перегрузки для стальных элементов; изоляционных материалов, выполняемых в заводских условиях; временных снеговых нагрузок соответственно. Общий вид таблицы РСН с сформированными пользовательскими сочетаниями представлен на рисунке 8.

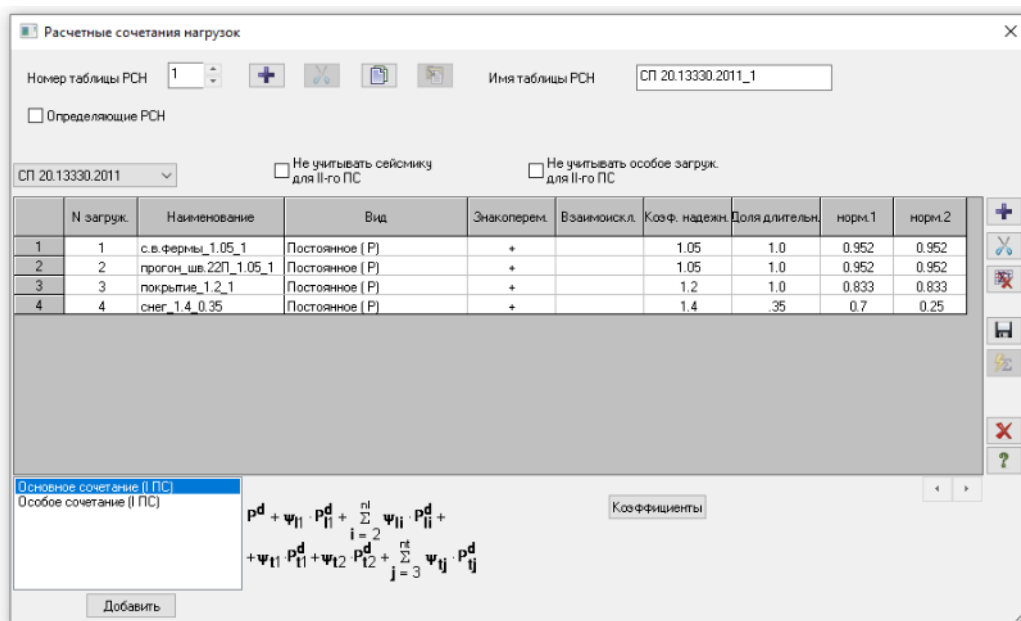


Рисунок 9. Общий вид таблицы РСН
Результаты расчета

На рисунке 10 представлены результаты расчетов конструкции фермы от нормативных значений постоянных и временной снеговой нагрузки без выделенной доли длительности в пользовательском сочетании РСН. Максимальные вертикальные перемещения узловых элементов фермы составили 87мм.

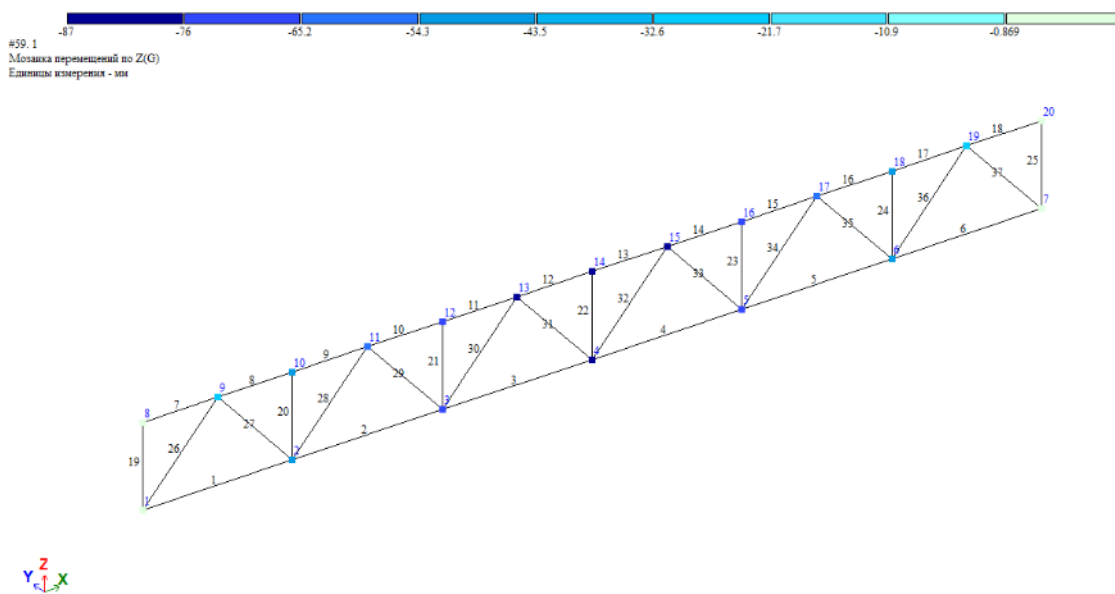


Рисунок 10. Вертикальные перемещения ферменной конструкции без выделения доли длительности временной снеговой нагрузки

На рисунке 11 представлены результаты расчетов конструкции фермы от нормативных значений постоянных и временной снеговой нагрузки с выделенной долей длительности в пользовательском сочетании РСН. Максимальные вертикальные перемещения узловых элементов фермы составили 48.4 мм.

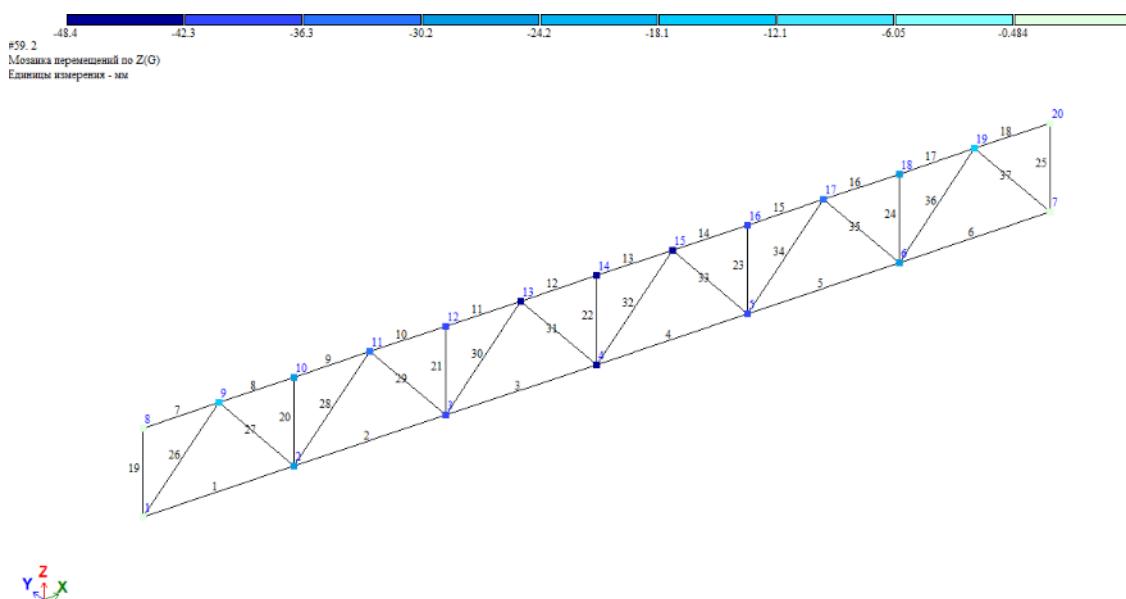


Рисунок 11. Вертикальные перемещения ферменной конструкции при выделении доли длительности временной снеговой нагрузки

Таким образом, оценка деформативности фермы определена в трех вариантах: из условия достижения конструкцией фермы предельно-допустимого прогиба $D_{1/200L}$; по полученным фактическим вертикальным перемещениям узлов фермы без учета выделенной доли длительности временной снеговой нагрузки D_S ; а также, по полученным фактическим вертикальным перемещениям узлов фермы с учетом выделенной доли длительности временной снеговой нагрузки $D_S^{\text{длит}}$.

Результаты расчетов деформативности конструкции стальной фермы по нормативным нагрузкам, а также сравнения полученных результатов прогибов и вертикальных узловых перемещений представлены в сводной таблице №2.

Таблица №2

Сводные результаты расчета конструкции фермы

№ п/п	Наименование параметра	Условное обозначение	Единица измерения	Значение величины
1	Величина прогиба при расчете из условия $f_{ult}=(1/200)*L$	$D_{1/200L}$	мм	180
2	Вертикальные перемещения конструкции фермы без учета выделенной доли длительности временной снеговой нагрузки	D_S	мм	87
3	Вертикальные перемещения конструкции фермы с учетом выделенной доли длительности временной снеговой нагрузки	$D_S^{длит}$	мм	48.4
4	Сравнение результатов определения вертикальных перемещений узлов конструкции стальной фермы под нагрузками	$D_{1/200L} / D_S$	-	2.07
5		$D_{1/200L} / D_S^{длит}$	-	3.72
6		$D_S / D_S^{длит}$	-	1.79

Сравнение результатов расчета показывает, что:

1. Величина прогиба при расчете из условия $f_{ult}=(1/200)*L$ составляет 180 мм.
2. Вертикальные перемещения конструкции фермы без учета выделенной доли длительности временной снеговой нагрузки $D_S=87$ мм.

3. Вертикальные перемещения конструкции фермы с учетом выделенной доли длительности временной снеговой нагрузки $D_S^{\text{длит}}=48.4$ мм.
4. Разница между вертикальными деформациями $D_{1/200L}$ и D_S составила 2.07 раза.
5. Разница между вертикальными деформациями $D_{1/200L}$ и $D_S^{\text{длит}}$ составила 3.72 раза.
6. Разница между вертикальными деформациями D_S и $D_S^{\text{длит}}$ составила 1.79 раза.

Выводы

1. На основе программного комплекса Лира САПР создана модель конструкции стальной фермы и получены достоверные результаты деформированного состояния узлов и элементов конструкции под суммарным действием постоянных и временной нагрузок.
2. Установлено влияние зависимости между методикой оценки деформативности конструкции и полученными в результате расчета вертикальными перемещениями.
3. Таким образом введение в расчет выделенной доли длительности нагрузки $D_S / D_{S^{\text{длит}}}$ позволяет в 1.79 раза уточнить величину вертикальных перемещений узлов конструкции.
4. Полученные результаты показывают, что выделение доли длительности действия нагрузки позволяет скорректировать величину прогиба на 55%.

Литература

1. Тихонов С. М., Алехин В. Н., Беляева З. В., Кудрявцев С. В., Рыбаков В. А., Назмеева Т. В., Пронин Д. Г., Комиссаров А. А. Проектирование металлических конструкций. Часть 1: «Металлические конструкции.

- Материалы и основы проектирования». Учебник для ВУЗов. Москва. Издательство «Перо». 2020. 468 с.
2. Туснин А. Р., Рыбаков В. А., Назмеева Т. В. Проектирование металлических конструкций. Часть 2: «Металлические конструкции. Специальный курс». Учебник для ВУЗов. Москва. Издательство «Перо», 2020. 436 с.
 3. Соболев Ю.В. Теория стальных строительных конструкций. СПб. Политехника. 2021. 542 с.
 4. Сниткин В.М., Фролов И.П., Овсянников Е.М., Овсянников В.Е. Оценка остаточного ресурса мостовых кранов решетчатого сечения. Инженерный вестник Дона, 2015, №3. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2015/3128.
 5. Черпаков А.В., Есипов Ю.В., Гончаров О.Ю., Гриценко В.В., Зотов А.И., Бутенко Ю.И., Шакирзянов Ф.Р. Построение критерия идентификации поврежденности на основе фазовых портретов колебаний ферменных конструкций. Инженерный вестник Дона, 2015, №4. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2015/3408.
 6. Воронкова Г.В., Габова В.В., Душко О.В., Торгашин Г.А. Исследование динамических характеристик несущих ферм при выносе вентиляционного оборудования на кровлю цеха. Инженерный вестник Дона, 2019, №1. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n1y2019/5613.
 7. Перельмутер А.В., Кабанцев О.В., Пичугин С.Ф. Основы метода расчетных предельных состояниях. Москва. АСВ. 2019. 240с.
 8. Барабаш М.С., Ромашкина М.А. Проектирование конструкций рабочей площадки в ПК ЛИРА-САПР. Москва. АСВ. 2018. 148с.
 9. Городецкий А.С., Барабаш М.С., Сидоров В.Н. Компьютерное моделирование в задачах строительной механики. Москва. АСВ. 2016. 338с.
-

10. Барабаш М.С., Сорока Н.Н., Сурьянинов Н.Г. Нелинейная строительная механика с ПК ЛИРА-САПР. Москва. АСВ. 2019. 236с.

References

1. Tikhonov S. M., Alexin V. N., Belyaeva Z. V., Kudryavcev S. V., Ry`bakov V. A., Nazmeeva T. V., Pronin D. G., Komissarov A. A. Proektirovanie metallicheskih konstrukcij. Chast` 1: «Metallicheskie konstrukcii. Materialy` i osnovy` proektirovaniya». [Design of metal structures. Part 1: “Metal structures. Materials and basics of design»]. 2020. 468 p.
2. Tusnin A. R., Ry`bakov V. A., Nazmeeva T. V. Proektirovanie metallicheskih konstrukcij. Chast` 2: «Metallicheskie konstrukcii. Special`ny`j kurs». [Design of metal structures. Part 2: “Metal structures. Special Course»]. 2020. 436 p.
3. Sobolev Yu.V. Teoriya stal`ny`x stroitel`ny`x konstrukcij. [Theory of steel building structures]. 2021. 542 p.
4. Snitkin V.M., Frolov I.P., Ovsyannikov E.M., Ovsyannikov V.E. Inzhenernyj vestnik Dona, 2015, № 3. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2015/3128.
5. Cherpakov A.V., Esipov Yu.V., Goncharov O.Yu., Gritsenko V.V., Zotov A.I., Butenko Yu.I., Shakirzyanov F.R. Inzhenernyj vestnik Dona, 2015, № 4. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2015/3408.
6. Voronkova G.V., Gabova V.V., Dushko O.V., Torgashin G.A. Inzhenernyj vestnik Dona, 2019, No. 1. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n1y2019/5613.
7. Perelmuter A.V., Kabantsev O.V., Pichugin S.F. Osnovy` metoda raschetny`x predel`ny`x sostoyaniyax. [Fundamentals of the method of calculated limit states]. 2019. 240p.



8. Barabash M.S., Romashkin M.A. Proektirovanie konstrukcij rabochej ploshhadki v PK LIRA-SAPR. [Design of working platform structures in SP LIRA-SAPR]. 2018. 148p.
9. Gorodetsky A.S., Barabash M.S., Sidorov V.N. Komp`yuternoe modelirovanie v zadachax stroitel`noj mexaniki. [Computer modeling in problems of structural mechanics]. 2016. 338p.
10. Barabash M.S., Soroka N.N., Suryaninov N.G. Nelinejnaya stroitel`naya mexanika s PK LIRA-SAPR. [Nonlinear building mechanics with PC LIRA-SAPR]. 2019. 236p.