

## Напряженное состояние поперечной рамы стального каркаса при вариантном моделировании узлов фермы

*Т.В. Потапова*

*Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет*

**Аннотация:** Изучение способов моделирования узлов стальных конструкций с помощью систем автоматизированного проектирования является актуальным, так как расчет, наиболее точно отражающий действительную работу элементов, позволяет максимально рационально подобрать их сечение. Целью статьи является исследование влияния вариантов моделирования узлов фермы на напряженное состояние поперечной рамы. В качестве объекта рассматривается плоская рама двухэтажного здания со стропильной фермой из равнополочных уголков. Предметом исследования является напряженное состояние конструкции. Автором были решены следующие задачи: в программном комплексе ЛИРА-САПР созданы два варианта расчетных моделей рамы (с шарнирными и жесткими узлами фермы), выполнен сбор нагрузок, получены результаты статического расчета, проанализированы значения изгибающих моментов и поперечных сил в элементах, сделаны выводы о влиянии вариантов расчета на напряженное состояние.

**Ключевые слова:** врезной шарнир, жесткий узел, напряженно-деформированное состояние, поперечная рама, САПР, сталь, статическая схема, уголок, узел, ферма

Выбор правильной расчетной схемы при моделировании стальных каркасов зданий с помощью систем автоматизированного проектирования позволяет наиболее точно воспроизвести действительную работу конструкции [1, 2]. Тип соединения элементов оказывает большое влияние на их напряженно-деформированное состояние. Узлы стальных конструкций могут проектироваться жесткими, полужесткими или шарнирными [3]. Актуальным вопросом является моделирование стыков равнополочных уголков, часто применяемых в стропильных фермах благодаря простоте производства и монтажа, а также высокой прочности и небольшой массе [4]. При выполнении численных расчетов соединения стержней ферм принимаются шарнирными, однако в реальных конструкциях данные узлы обладают значительной жесткостью, что необходимо учитывать для рационального проектирования каркаса [5-7].

Целью статьи является изучение влияния способов моделирования узлов фермы на прочность поперечной рамы стального каркаса двухэтажного здания, являющейся объектом исследования. Предметом выступает напряженное состояние конструкции.

В ходе исследования были решены следующие задачи. В программном комплексе ЛИРА-САПР были созданы два варианта расчетной модели поперечной рамы стального каркаса двухэтажного здания. В качестве признака схемы был выбран вариант 2 – Три степени свободы в узле. В первом варианте все стыки стержней фермы приняты шарнирными (рис. 1), во втором – жесткими (рис. 2) [8].

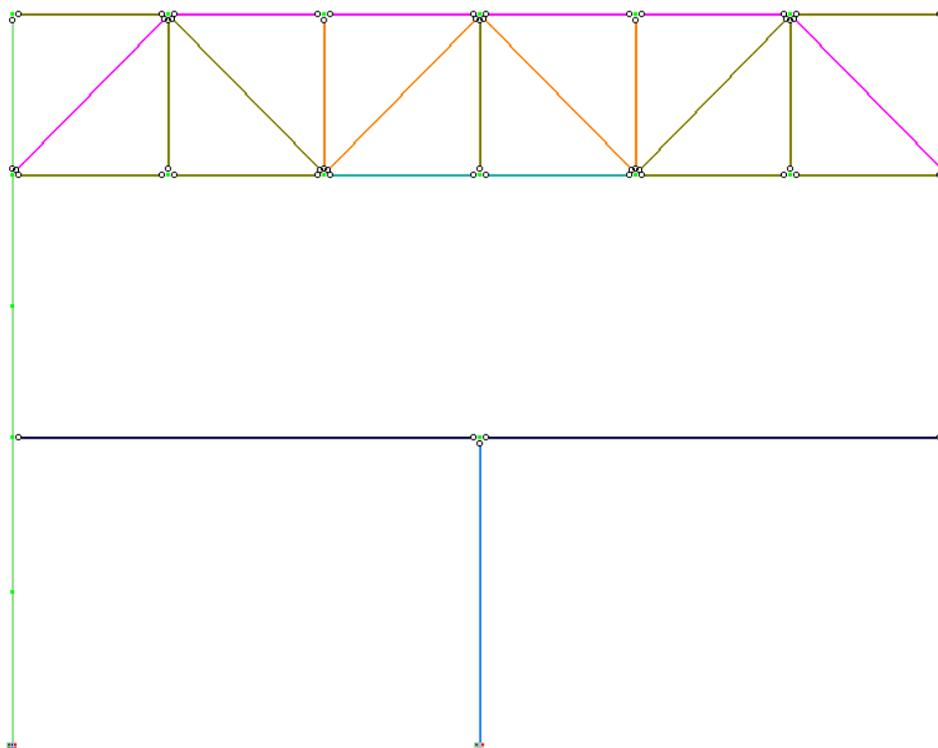


Рис. 1. – Расчетная модель рамы №1 с шарнирными узлами фермы

Был выполнен сбор нагрузок на поперечную раму, в который входили нагрузки от веса конструкций покрытия, снеговая, ветровая, а также нагрузка от собственного веса, которая учитывается в программном комплексе автоматически в соответствии с назначенными сечениями [9]. Шаг

поперечных рам принят равным 6 м. Расчет был выполнен для города Москва, относящегося к III снеговому и I ветровому районам.

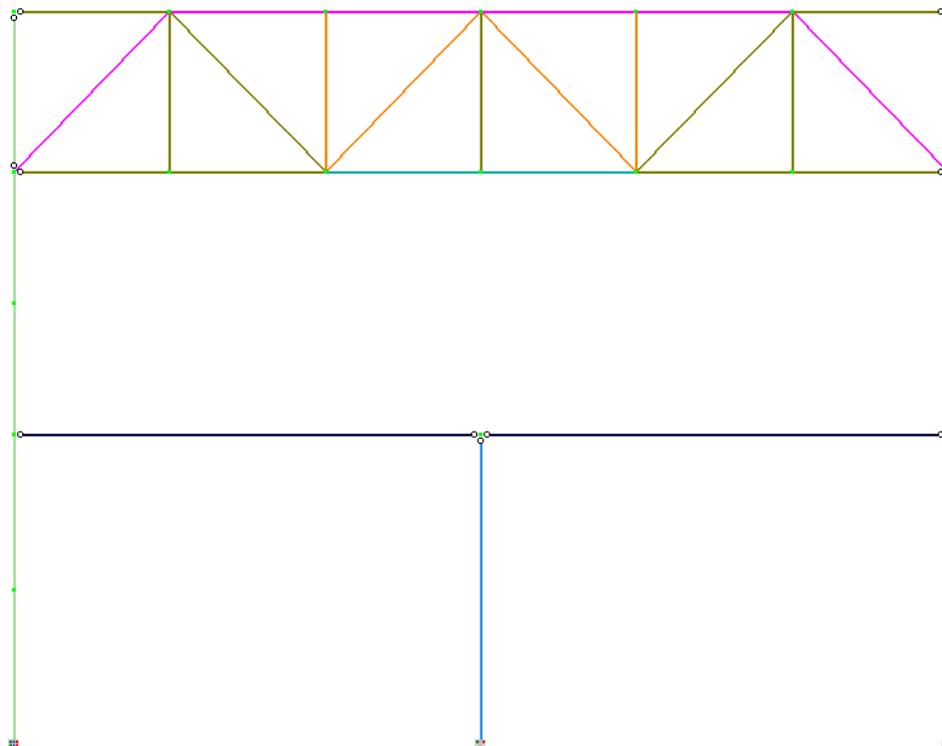


Рис. 2. – Расчетная модель рамы №2 с жесткими узлами фермы

На рис. 3 представлены сечения, назначенные элементам схемы.

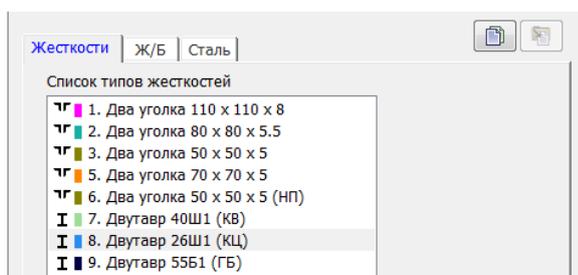


Рис. 3. – Список жесткостей, назначенных элементам модели

Схема поперечной рамы с прикладываемыми нагрузками представлена на рис. 4. Используются следующие обозначения:  $p_1$ ,  $F_1$ ,  $F_2$ ,  $F_1'$ ,  $F_2'$  – нагрузки от веса конструкций покрытия;  $S$ ,  $S_1$ ,  $S_2$  – снеговые нагрузки;  $M_\phi$  – момент, передающийся от фермы на внецентренно сжатую колонну;  $p_2$ ,  $q_2$  – нагрузки на главную балку;  $M_{ГБ}$  – момент, передающийся от главной балки на внецентренно сжатую колонну;  $p_3$ ,  $F_3$ ,  $F_3'$  – нагрузки от веса стенового

ограждения;  $q_4, q_4', F_4, F_4'$  – ветровые нагрузки;  $L$  – пролет рамы;  $H_1, H_2$  – высоты первого и второго этажей;  $h$  – высота стропильной фермы.

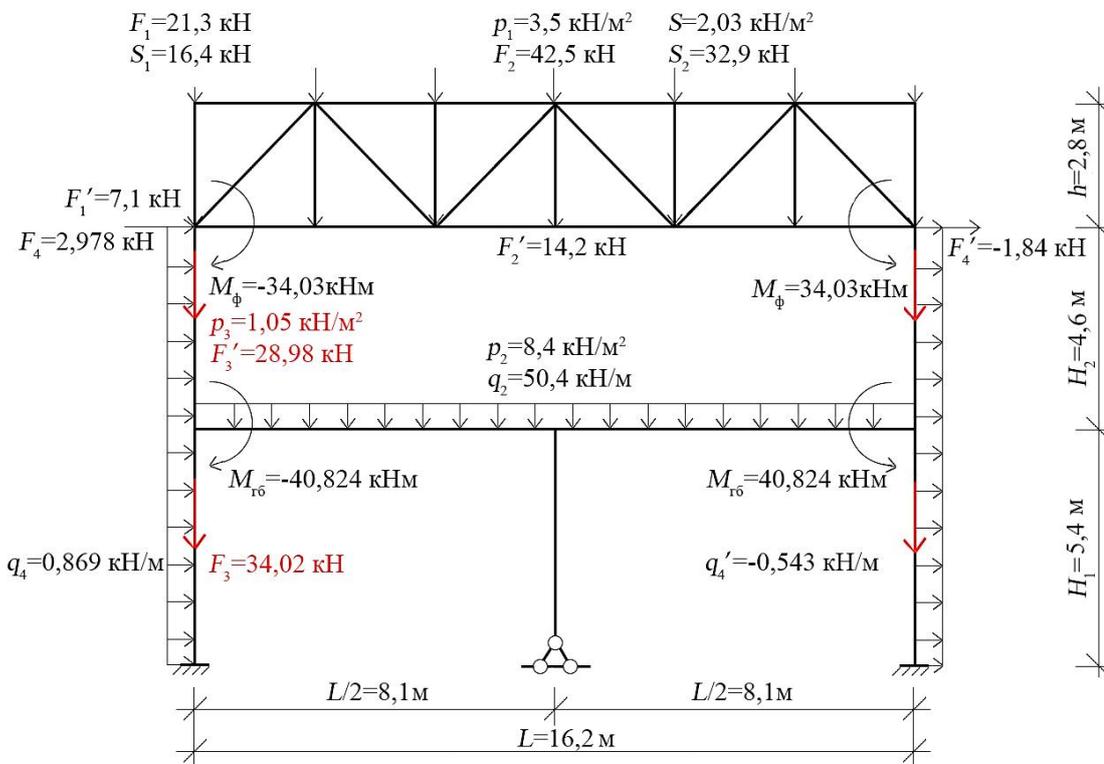


Рис. 4. – Расчетная схема поперечной рамы

Было сформировано пять расчетных сочетаний нагрузок (РСН), которые представлены на рис. 5.

Расчетные сочетания нагрузок

Номер таблицы РСН: 1  
 Имя таблицы РСН: СП 20.13330.2011\_2

Определяющие РСН

СП 20.13330.2011  Не учитывать сейсмичу для II-го ПС  Не учитывать особое загрузк для II-го ПС

	N загрузк	Наименование	Вид	Знакоперем.	Козф. надежн.	Доля длителен.	РСН1	РСН2	РСН3	РСН4	РСН5
1	1	P1+0,4P2+0,4Mгб+Mф+F3	Постоянное (P)	+	1.0	1.0	1.	1.	1.	1.	1.
2	2	0,6P2+0,6Mгб	Длит. доминир.1 (P1)	+	1.2	1.0	1.	1.	1.	1.	1.
3	3	Снег	Кратк. доминир.1 (Pt1)	+	1.2	.35	0.	1.	0.	1.	0.9
4	4	Ветер	Кратк. доминир.1 (Pt1)	+/-	1.2	.35	0.	0.	1.	0.9	1.

Рис. 5. – Расчетные комбинации нагрузок на поперечную раму

В таблице №1 приведены значения усилий, абсолютная величина которых по результатам расчета наиболее изменилась вследствие исключения шарниров из модели.

Таблица №1

Сравнение изгибающих моментов в расчетных моделях

№ РСН	$M$ , кНм (модель №1)	$M$ , кНм (модель №2)	$\Delta M$ , кНм	Название элемента
1	0	-2,87	+2,87	Опорные раскосы фермы в месте сопряжения с колонной
	-34,03	-36,90	+2,87	Левая колонна в месте сопряжения с фермой
	34,03	36,90	+2,87	Правая колонна в месте сопряжения с фермой
2	0	-4,64	+4,64	Опорные раскосы фермы в месте сопряжения с колонной
	-34,03	-38,67	+4,64	Левая колонна в месте сопряжения с фермой
	34,03	38,67	+4,64	Правая колонна в месте сопряжения с фермой
3	0	-5,14	+5,14	Правый опорный раскос фермы в месте сопряжения с колонной
	34,03	39,17	+5,14	Правая колонна в месте сопряжения с фермой
4	0	-6,69	+6,69	Правый опорный раскос фермы в месте сопряжения с колонной
	34,03	40,72	+6,69	Правая колонна в месте сопряжения с фермой
5	0	-6,74	+6,74	Правый опорный раскос фермы в месте сопряжения с колонной
	34,03	40,77	+6,74	Правая колонна в месте сопряжения с фермой

Максимальная разница между двумя схемами в значениях изгибающих моментов наблюдалась при РСН 5 (совместное действие постоянных, длительных, кратковременных снеговой и доминирующей ветровой нагрузки). Сравнение эпюр представлено на рис. 6.

В процентном соотношении максимальное изменение изгибающего момента при симметричных РСН 1 и 2 было зафиксировано в колоннах в уровне второго этажа: от +17,22 до -12,18 и от +42,48 до -11,00% соответственно.

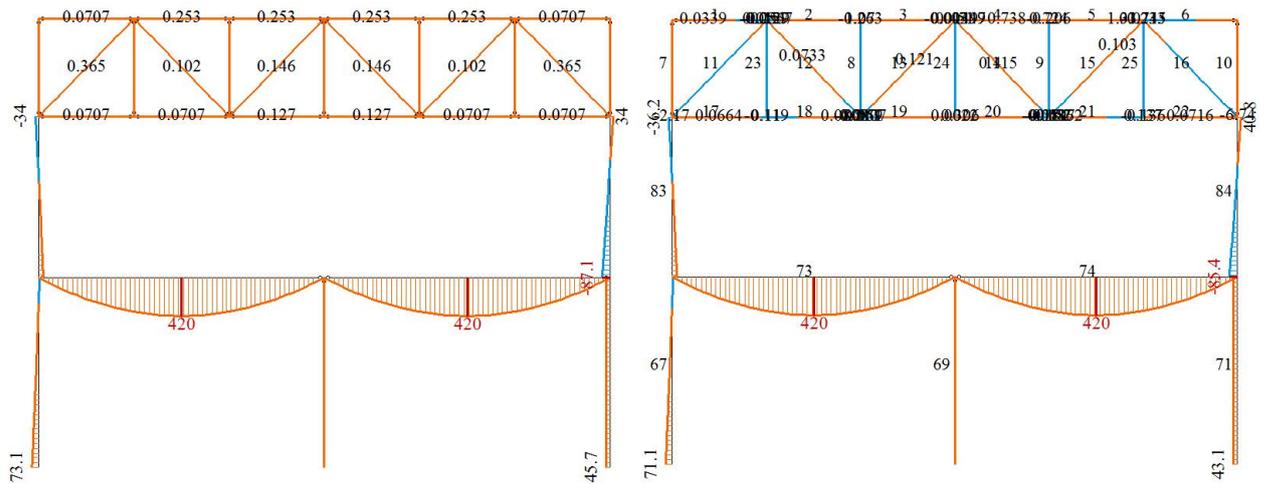


Рис. 6. – Сравнение эпюр изгибающих моментов (РСН 5) в моделях №1 и №2  
Значения продольных сил приведены в таблице №2.

Таблица №2

Сравнение продольных сил в расчетных моделях

№ РСН	N, кН (модель №1)	N, кН (модель №2)	$\Delta N$ , кН	Название элемента
1	121,52	119,64	-1,88	Крайние левая и правая панели нижнего пояса фермы
2	197,28	194,14	-3,14	Крайние левая и правая панели нижнего пояса фермы
3	120,69	118,02	-2,67	Крайняя правая панель нижнего пояса фермы
4	196,53	192,69	-3,84	Крайняя правая панель нижнего пояса фермы
5	188,87	185,07	-3,80	Крайняя правая панель нижнего пояса фермы

Максимальное увеличение момента происходит в верхней половине, уменьшение – в середине верхней части колонны. При РСН 3, 4 и 5, включающих ветровую нагрузку, максимальное изменение наблюдалось в уровне второго этажа в правой колонне (с подветренной стороны) в тех же сечениях: от +50,92 до -19,81, от +113,12 до -16,16% и от +113,64 до -16,79%.

Максимальный процент увеличения продольной силы был зафиксирован в главной балке: на 3,54, 4,21, 3,68, 4,33 и 4,29% при РСН 1-5 соответственно.

В результате сравнения расчетных схем были сделаны следующие выводы. Способ моделирования узлов фермы (жесткое или шарнирное) влияет на распределение усилий в элементах поперечной рамы. Наибольший рост изгибающих моментов наблюдается в опорных раскосах фермы вблизи узла сопряжения со стойками и в верхних частях колонн. При этом в середине верхних частей колонн изгибающий момент уменьшается.

Продольные силы максимально уменьшаются в крайних панелях нижнего пояса стропильной фермы и увеличиваются в пролетах главной балки.

Наибольшее влияние изменение способа моделирования узлов фермы имеет при сочетании снеговой и ветровой нагрузок, минимальное – при учете только постоянных и длительных нагрузок.

При расчете поперечного каркаса здания необходимо уделять внимание выбору правильного сопряжения элементов стропильной фермы. Особое влияние это оказывает на узел соединения фермы с колонной, рациональное проектирование которого позволяет снизить расходы на производство и монтаж конструкций [10].

### Литература

1. Линьков Н.В. Напряженное состояние стальной пролетной конструкции при различных решениях расчетной схемы // Инженерный вестник Дона, 2024, №3 URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2024/9080](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2024/9080).

2. Рогожина А.В. Вариантное моделирование стальных колонн промышленного здания с последующей верификацией полученных результатов // Инженерный вестник Дона, 2023, №6 URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/n6y2023/8445](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n6y2023/8445).

3. Jaroszewski T., Miari M., Falborski T., Jankowski R. Shaking table experimental study on models of steel buildings with different types of joints // Measurement, 2023, vol. 206. URL: [doi.org/10.1016/j.measurement.2022.112260](https://doi.org/10.1016/j.measurement.2022.112260).

4. Gomes Jr J.O., Carvalho H., Simões da Silva L., Ferreira Filho J.O., Lavall A. Assessment of design procedures for the buckling resistance of hot-rolled steel equal leg angles under concentric and eccentric compression // Structures, 2023, vol. 57 URL: doi.org/10.1016/j.istruc.2023.105308.

5. Себешев В.Г., Люфт Н.А., Никольский А.В. Комплексный анализ устойчивости ферм с использованием корректных расчетных моделей // Известия высших учебных заведений. Строительство. 2022. №9 (765). С. 78-90 URL: doi.org/10.32683/0536-1052-2022-765-9-78-90.

6. Туснина В.М., Платонова В.Д. Численный анализ жесткости фланцевых узлов «балка-колонна» // Промышленное и гражданское строительство. 2020. №9. С. 28-33 URL: elibrary.ru/item.asp?id=44031405.

7. Малышкин А.П., Есипов А.В. Экспериментально-теоретические исследования стальных ферм покрытия легкоатлетического манежа в г. Тюмени // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Строительство и архитектура. 2015. №2. С. 105-115 URL: doi.org/10.15593/2224-9826/2015.2.08.

8. Гринёва Ю.И. Анализ статических схем стальной стропильной фермы // Шаг в науку. 2020. №1. С. 15-19 URL: elibrary.ru/item.asp?id=42840842.

9. Линьков Н.В. Расчет деформативности конструкции стальной фермы с учетом выделенной доли длительности нагрузки // Инженерный вестник Дона, 2023, №1. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n1y2023/8143.

10. Rangel J.V.S., Falcon G.A.S., Medeiros C.A. Optimum design of steel frames considering semi-rigid joints // Proc. XXXVIII Iberian Latin-American Congress on Computational Methods in Engineering. Florianópolis, Brazil, 2017 URL: researchgate.net/publication/321510257.

### References

1. Linkov N.V. Inzhenernyj vestnik Dona, 2024, №3. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2024/9080.



2. Rogozhina A.V. Inzhenernyj vestnik Dona, 2023, №6. URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/n6y2023/8445](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n6y2023/8445).
3. Jaroszewski T., Miari M., Falborski T., Jankowski R. Measurement, 2023, vol. 206. URL: [doi.org/10.1016/j.measurement.2022.112260](https://doi.org/10.1016/j.measurement.2022.112260).
4. Gomes Jr J.O., Carvalho H., Simões da Silva L., Ferreira Filho J.O., Lavall A. Structures, 2023, vol. 57. URL: [doi.org/10.1016/j.istruc.2023.105308](https://doi.org/10.1016/j.istruc.2023.105308).
5. Sebeshev V.G., Lyuft N.A., Nikolskiy A.V. Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Stroitel'stvo. 2022. №9 (765). Pp. 78-90. URL: [doi.org/10.32683/0536-1052-2022-765-9-78-90](https://doi.org/10.32683/0536-1052-2022-765-9-78-90).
6. Tushina V.M., Platonova V.D. Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo. 2020. №9. Pp. 28-33. URL: [elibrary.ru/item.asp?id=44031405](http://elibrary.ru/item.asp?id=44031405).
7. Malyshkin A.P., Esipov A.V. Vestnik Permskogo natsional'nogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta. Stroitel'stvo i arkhitektura. 2015. №2. Pp. 105-115. URL: [doi.org/10.15593/2224-9826/2015.2.08](https://doi.org/10.15593/2224-9826/2015.2.08).
8. Grineva Y.I. Shag v nauku. 2020. №1. Pp. 15-19. URL: [elibrary.ru/item.asp?id=42840842](http://elibrary.ru/item.asp?id=42840842).
9. Linkov N.V. Inzhenernyj vestnik Dona, 2023, №1. URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/n1y2023/8143](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n1y2023/8143).
10. Rangel J.V.S., Falcon G.A.S., Medeiros C.A. Proc. XXXVIII Iberian Latin-American Congress on Computational Methods in Engineering. Florianópolis, Brazil, 2017. URL: [researchgate.net/publication/321510257](https://researchgate.net/publication/321510257).

**Дата поступления: 6.04.2024**

**Дата публикации: 8.05.2024**