

Об ошибках проектирования строительных конструкций

Ю.Ю. Арушонок

Волгоградский государственный технический университет

Аннотация: Согласно статистическим данным, ошибки проектирования строительных конструкций являются одной из основных причин аварий зданий и сооружений различного назначения. В статье рассматриваются результаты обследования и поверочных расчетов несущих конструкций покрытия промышленного здания. Установлено, что ошибки, допущенные при проектировании и монтаже металлических стропильных ферм здания, привели к изменению их конструктивной схемы, перераспределению усилий в стержнях и, как следствие, массовой потере устойчивости перегруженными сжатыми элементами. Анализ подобных ситуаций позволяет избегать их повторения, не допускать возникновения аварийных ситуаций и неоправданного увеличения материально-финансовых затрат в процессе эксплуатации объектов.

Ключевые слова: ошибка проектирования, дефект монтажа, конструктивная схема, перегрузка, металлическая ферма.

История развития строительства показывает, что при разработке проектов часто допускаются ошибки, которые могут приводить к большим материальным потерям, авариям или катастрофам [1]. Анализ влияния некоторых ошибочных решений был выполнен в работе [2].

Представленные в работах [3, 4] результаты анализа аварий 757 мостов, произошедших в период с 1966 по 2018 годы в более чем 70-ти странах, показывают резкий рост числа аварий (в 6,5 раз) в 2000-2015 годах. Результаты дальнейшей работы с этими статистическими данными представлены в статьях [5, 6]. Заявлено, что причинами аварий были следующие основные факторы: опасности природного характера (18,7% случаев), опасные действия людей (17,4%), ошибки проектирования и строительства (31,8%) и неправильная эксплуатация (32,1%).

В работах [7, 8] представлены результаты анализа отечественных и зарубежных данных по причинам отказов строительных конструкций зданий, согласно которым на проектные ошибки (стадия проектирования) приходилось от 18 до 51% случаев отказов. При этом наиболее часто у

металлических конструкций технической причиной отказа была потеря устойчивости элементами (от 22 до 44% случаев).

В качестве примера ошибок проектирования и их последствий в настоящей работе рассматриваются основные результаты обследования несущих конструкций покрытия склада сырья Волжского абразивного завода, проведённого в 2003 и 2004 годах [9].

Склад сырья предназначен для размещения песка и нефтекокса. Он построен по проекту Ленинградского отделения института «ГИПРОСТАНОК» в начале 60-х годов прошлого столетия и представляет собой одноэтажное двухпролётное неотапливаемое здание прямоугольной формы в плане с размерами в осях 66×144 м.

Конструктивно здание выполнено по схеме смешанного каркаса. Колонны каркаса - сборные железобетонные с отметкой верха +14,350 по крайним рядам и +17,800 по среднему ряду.

Ригелями поперечных рам каркаса служат стальные стропильные фермы из парных уголков пролётом 33 м (рис. 1). В покрытии здания устроен светоаэрационный продольный фонарь из металлоконструкций пролётом 15 м. По стропильным фермам уложены сборные железобетонные ребристые плиты. Кровля здания холодная в виде рубероидного ковра по выравнивающей цементно-песчаной стяжке.

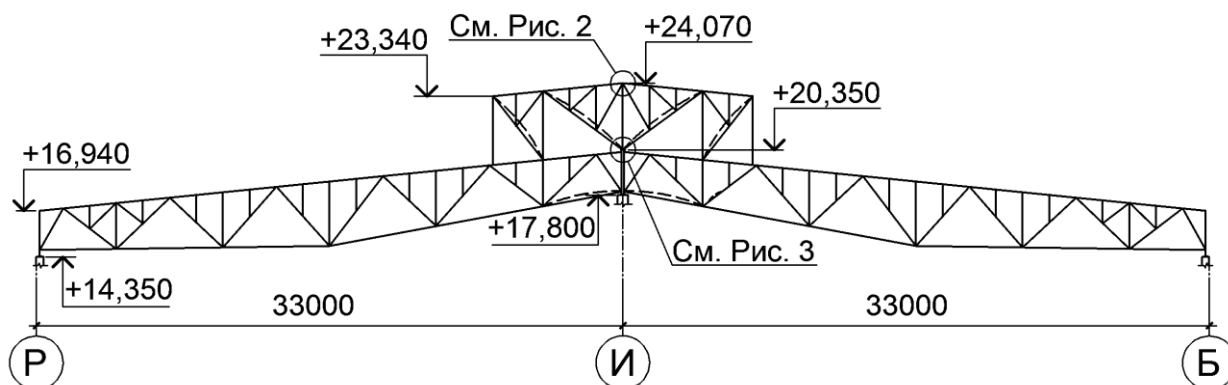


Рис. 1. Схема стропильных ферм и фонаря склада сырья

В ходе обследования конструкций покрытия выявлено нижеследующее.

1) Центральные сжатые раскосы у 43% фонарей имели значительный выгиб из плоскости фермы (на рис. 1 показан пунктирными линиями). Стрелка выгиба достигала 100-120 мм.

2) Опорные сжатые раскосы у 73% фонарей имели значительный выгиб (до 100 мм) в плоскости фонаря (на рис. 1 показан пунктирными линиями).

3) Основные и шпренгельные стойки у 20% фонарей имели искривление в плоскости фонаря или из нее. Данное повреждение сопутствовало повреждениям по пунктам 1 и 2.

4) Все стыки пояса в коньковых узлах фонаря были выполнены в соответствии с проектными чертежами с помощью стальных накладок на сварке (рис. 1 и 2). Из-за неразрезности стыков поясов фонарей на их элементы передаются дополнительные непроектные усилия от стропильных ферм. Ошибка проектирования.



Рис. 2. Фото конькового узла фонаря

5) Опорная пластина центральной стойки у большинства фонарей приварена к опорным пластинам стропильных ферм (рис. 3), что создает неразрезность по верхним поясам ферм. Дефект монтажа.

6) Раскосы у 2 из 28 стропильных ферм имеют изгиб в плоскости фермы величиной до 40 мм.

7) Элементы опорных панелей нижнего пояса у 7% стропильных ферм у оси И имеют визуально видимый выгиб в плоскости фермы (на рис. 1 показан пунктиром), что указывает на наличие в них сжимающих усилий.

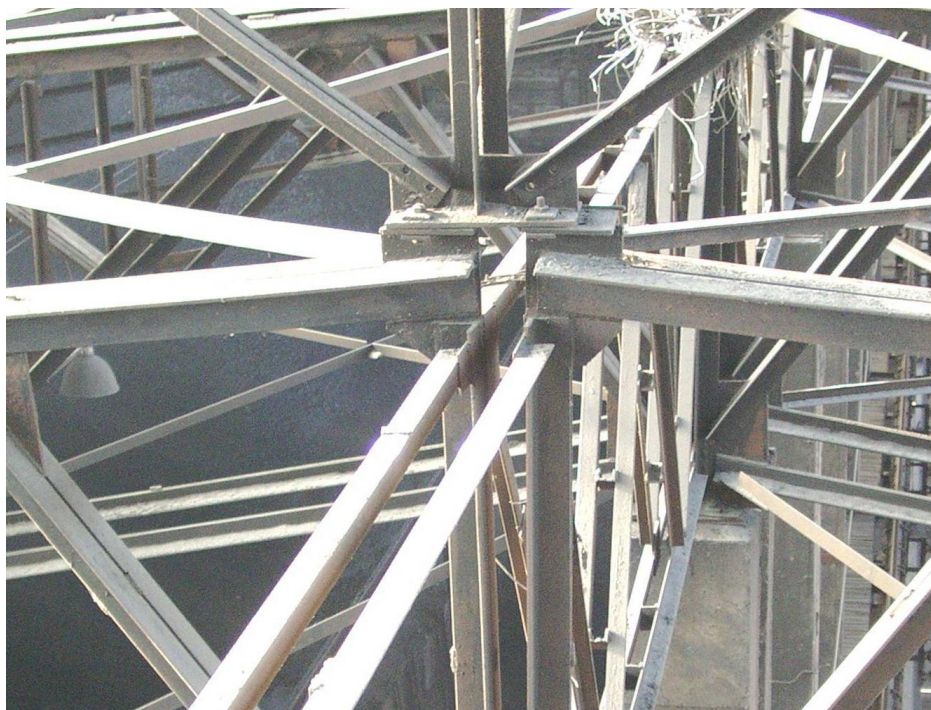


Рис. 3. Фото конькового узла стропильных ферм

8) Верхние пояса всех стропильных ферм в коньковых узлах по оси И соединяются с помощью стальной пластины, отверстия под болты в которой имеют круглую (вместо овальной) форму (рис. 3). Данное проектное решение исключает возможность независимых горизонтальных смещений соединяемых элементов поясов ферм и вызывает их работу по неразрезной схеме. Ошибка проектирования.

9) Фактический состав кровли склада сырья не соответствует проектным данным, так, вместо асфальтовой выравнивающей стяжки толщиной 15 мм выполнена цементно-песчаная стяжка толщиной 20 мм, рубероидная кровля имеет не предусмотренную проектом защитную гравийную посыпку толщиной 15-20 мм. Отступление от проекта, приведшее к увеличению нагрузок на конструкции.

Поверочный расчёт конструкций покрытия включал статический расчет с учетом выявленных ошибок проектирования и дефектов монтажа на фактические нагрузки и проверки отдельных элементов конструкций при самых невыгодных расчетных сочетаниях усилий (PCY) по предельным состояниям первой группы.

Поверочные расчеты выполнялись в программном комплексе «ЛИРА», реализующем метод конечных элементов в перемещениях.

Были сформированы три расчетных модели стропильных конструкций здания, нагруженных эксплуатационными нагрузками:

- с неразрезными конструкциями коньковых стыков поясов ферм и фонаря (задача SF1) - соответствует фактической ситуации;
- с разрезным коньковым узлом ферм и неразрезным коньком фонаря (задача SF2) - соответствует проектным чертежам узлов;
- вариант с разрезной конструкцией обоих коньковых узлов (задача SF3) - соответствует принятой в проекте расчётной схеме стропильных ферм.

На рис. 4 для задачи SF3 результаты проверок всех стержней по первой группе предельных состояний на действие PCY представлены цветовой окраской, которая обозначает степень исчерпания несущей способности соответствующего элемента в процентах. Наиболее значимые результаты расчетов для всех задач отражены в табл. 1 ниже. Также в таблице приведены проектные значения расчетных усилий в элементах ферм, в скобках указаны максимальные их величины.

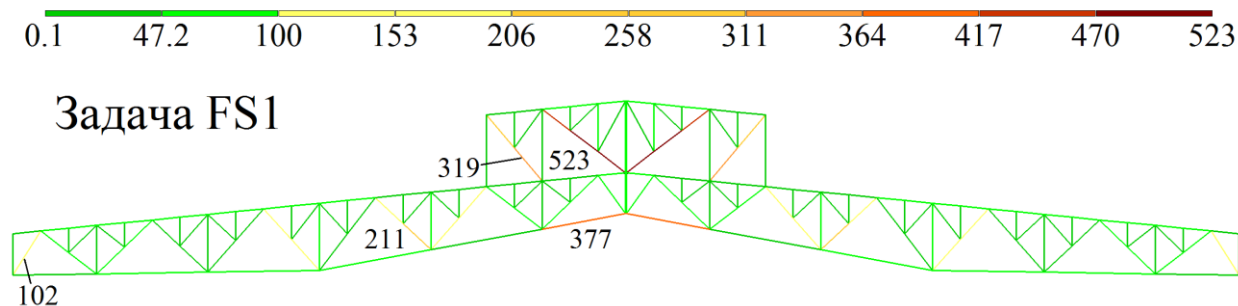


Рис. 4. Результаты проверок по предельным состояниям 1-ой группы

Таблица 1

Экстремальные усилия и проценты исчерпания несущей способности элементов конструкций

Задача	Фермы								Фонарь	
	Нижний пояс		Верхн. пояс		Раскосы		Раскосы оп.		Раскосы	
	N, тн	%	N, тн	%	N, тн	%	N, тн	%	N, тн	%
SF1	-59,0	377	-72,9	<100	-24,4	211	-40,1	102	-33,9	523
SF2	-40,2	257	-74,3	<100	-23,6	204	-40,6	103	-42,4	653
SF3	15,6 (113,4)	118П	-111,8	105	-47,6	117	-52,6	133	-9,6	148
Проект	20,6 (82,5)		-81,3 (0)		-26,2 (48,2)		-39,9			

Анализ обобщённых результатов расчёта конструкций покрытия позволяет констатировать нижеследующее.

Задача SF3. В случае реализации правильного проектного решения коньковых узлов ферм и фонаря по разрезной схеме в элементах стропильных ферм наблюдалось перенапряжение по устойчивости от 5% до 33% в зависимости от типа элементов, и только у стержней нижнего пояса отмечалось перенапряжение по прочности 18% (помечено буквой П в табл. 1).

Перенапряжение в раскосах фонаря по устойчивости достигало 48%.

Данные результаты объясняются повышенными по сравнению с проектными постоянными (на 37,8%) и снеговыми (на 22,4%) нагрузками.

Увеличение нагрузок обусловлено отступлением от проекта по п. 9 выше и разными снеговыми нагрузками в нормах, действовавших на момент обследования здания (СНиП 2.01.07-85*) и на момент его проектирования (СН-69-59).

Задача SF2. Введение неразрезности по поясу фонаря приводит к изменению конструктивной схемы покрытия здания, что, в свою очередь, вызывает значительное перераспределение усилий в элементах конструкций. Так, в элементах нижнего пояса, примыкающих к колонне среднего ряда по оси И, возникает продольное усилие противоположного знака (сжатие вместо растяжения) вдвое больше проектного значения (по модулю), из-за чего они не проходили по устойчивости с перенапряжением более чем в 2,5 раза (табл. 1).

Усилия в элементах верхнего пояса ферм в пределах ширины фонаря также меняют знак (растяжение вместо сжатия), но это не приводит к наступлению предельных состояний первой группы.

Значительно ухудшается положение основных раскосов стропильных ферм, сжимающие усилия в некоторых из них возрастают почти в 9 раз по сравнению с проектными значениями, что приводит к двукратному перенапряжению по устойчивости.

Наиболее радикальные изменения в работе выявлены у центральных раскосов фонаря, где возрастание сжимающей продольной силы в 4,4 раза приводит к перенапряжению по устойчивости в 6,53 раза (см. табл. 1). Не отвечают эти раскосы и требованиям по прочности.

Задача SF1. Добавление неразрезности в коньковом узле стропильных ферм дополнительно усугубляет ситуацию по сравнению с задачей SF2. Так, продольное сжимающее усилие в элементах нижнего пояса, примыкающих к колонне среднего ряда, превышает проектное значение в 2,9 раза, а процент исчерпания несущей способности по устойчивости достигает величины 377%

(перегрузка в 3,77 раза). Процент исчерпания несущей способности по устойчивости раскосов возрастает до 211%, а центральных раскосов фонаря - снижается до 523%.

Таким образом, расчёты конструкций покрытия показали, что:

- в наиболее сложных условиях работают центральные и опорные раскосы фонаря. Наибольшее перенапряжение в них по устойчивости составляет более 5 раз;

- в опорных панелях нижнего пояса стропильных ферм, примыкающих к оси И, вместо растяжения по проекту действуют сжимающие усилия. Эти элементы не проходят по устойчивости;

- часть сжатых раскосов стропильных ферм не удовлетворяет требованиям по устойчивости с максимальным процентом исчерпания несущей способности 211% (перегрузка в 2,11 раза).

Выводы. Обобщая результаты обследования и поверочных расчётов конструкций покрытия, можно заключить следующее.

При проектировании несущих конструкций покрытия были допущены ошибки конструктивного исполнения стыков в коньковых узлах стропильных ферм (п. 8) и ферм фонаря (п. 4). Фактически неразрезная конструкция этих узлов не соответствует принятой в расчётах стропильных ферм разрезной конструкции. Это обстоятельство привело к включению в совместную работу стропильных ферм обоих пролётов, а также расположенной над ними конструкции фонаря. Ситуацию усугубили отступления от проекта, допущенные при строительстве (п. 9).

В результате допущенных ошибок проектирования и отступлений от проекта при монтаже произошло перераспределение усилий в значительной части элементов конструкций, а в отдельных элементах изменился характер нагружения (вместо растяжения действует сжатие). Следствием этого стала массовая потеря ими устойчивости, особенно часто у раскосов фонаря.

С учётом выявленных в ходе обследования повреждений и результатов поверочного расчёта стропильных ферм и конструкций фонаря были разработаны чертежи по их усилению, впоследствии реализованные на практике [10].

Ошибки, допущенные при проектировании стропильных конструкций склада сырья, в процессе эксплуатации здания привели к значительным материальным и финансовым затратам на восстановление их работоспособного технического состояния.

Анализ подобных ситуаций позволяет избегать их повторения, не допускать возникновения аварийных ситуаций и неоправданного увеличения материально-финансовых затрат в процессе эксплуатации объектов.

Литература

1. Добромыслов А.Н. Ошибки проектирования строительных конструкций. М. АСВ, 2007. 184 с.
2. Nowak A.S., Carr R.I. Sensitivity Analysis for Structural Errors // Journal of Structural Engineering. Vol. 111. No. 8. 1985. pp. 1734-1746. DOI: 10.1061/(ASCE)0733-9445(1985)111:8(1734).
3. Сырков А.В., Сизиков А.С. Методы повышения надежности мостов на основе анализа статистики отказов // Дороги. Инновации в строительстве. 2019. №79. С. 32-38.
4. Syrkov A., Høj N.P. Bridge failures analysis as a risk-mitigating tool. In IABSE Symposium: Towards a Resilient Built Environment - Risk and Asset Management, Guimarães, Portugal. IABSE. 2019. pp. 304–310.
5. Galvão N., Matos J.C., Oliveira D.V., Hajdin R. Human error impact in structural safety of a reinforced concrete bridge // Journal Structure and Infrastructure Engineering. 2021. DOI: 10.1080/15732479.2021.1876105.

6. Galvão N., Matos J.C., Oliveira D.V. Human error - induce risk in reinforced concrete bridge engineering // Journal of Performance of Constructed Facilities. 2021. Vol. 35. Issue 4. DOI: 10.1061/(ASCE)CF.1943-5509.0001595.

7. Добромыслов А.Н. Анализ аварий промышленных зданий и инженерных сооружений // Промышленное строительство. 1990. №9. С. 9-10.

8. Конаков А.И., Махов А.П. Отказы и усиление строительных металлических конструкций // Строительные конструкции. Обзорная информация. Выпуск 4. М: ВНИИИС, 1981. С. 17-18.

9. Заключение о техническом состоянии и условиях безаварийной эксплуатации несущих конструкций покрытия склада сырья ОАО «Волжский абразивный завод», ЭБЗ-012-2004. ООО «Экспертиза безопасности зданий». 2004. 70 с.

10. Заключение о техническом состоянии несущих конструкций покрытия склада сырья ОАО «Волжский абразивный завод» после усиления, ЭБЗ-022-2005. ООО «Экспертиза безопасности зданий». 2005. 72 с.

References

1. Dobromyslov A.N. Oshibki proektirovaniya stroitel'nykh konstrukcij [Errors of design of building constructions]. М.: ASV, 2007. 184 p.

2. Nowak, A.S. and R.I. Carr. Journal of Structural Engineering. 1985. Vol. 111. Issue 8. pp. 1734-1746.

3. Syrkov A.V., Sizikov A.S. Dorogi. Innovacii v stroitel'stve. 2019. №79. pp. 32-38.

4. Syrkov A., Høj N.P. Bridge failures analysis as a risk-mitigating tool. In IABSE Symposium: Towards a Resilient Built Environment - Risk and Asset Management, Guimarães, Portugal. IABSE. 2019. pp. 304–310.

5. Galvão N., Matos J.C., Oliveira D.V., Hajdin R. Journal Structure and Infrastructure Engineering. 2021. DOI: 10.1080/15732479.2021.1876105.



6. Galvão N., Matos J.C., Oliveira D.V. Journal of Performance of Constructed Facilities. 2021. Vol. 35. Issue 4. DOI: 10.1061/ (ASCE)CF.1943-5509.0001595.
7. Dobromyslov A.N. Promyshlennoe stroitel'stvo. 1990. №9. pp. 9-10.
8. Konakov A.I., Makhov A.P. Otkazy i usilenie stroitel'nykh metallicheskih konstrukcij. Stroitel'stvo i arkhitektura. Ser. 8. Stroitel'nye konstrukcii. Obzornaya informaciya. Vypusk 4. M.: VNIIS, 1981. 52 p.
9. Zaklyuchenie o tekhnicheskom sostoyanii i usloviyakh bezavarijnoj ehkspluatacii nesushchikh konstrukcij pokrytiya sklada syr'ya OAO «Volzhskij abrazivnyj zavod» [Conclusion about technical condition and conditions of accident-free operation of load-carrying structures of covering of warehouse of raw materials JSC «Volzhsky Abrasive Works»], EHBZ-012-2004. OOO «Ehkspertiza bezopasnosti zdaniJ». 2004. 70 p.
10. Zaklyuchenie o tekhnicheskom sostoyanii nesushchikh konstrukcij pokrytiya sklada syr'ya OAO «Volzhskij abrazivnyj zavod» после usileniya [Conclusion about technical condition of load-carrying structures of covering of warehouse of raw materials JSC «Volzhsky Abrasive Works» after strengthening], EHBZ-022-2005. OOO «Ehkspertiza bezopasnosti zdaniJ». 2005. 72 p.