

Коэффициенты динамичности при локальном повреждении стропильной фермы в стальном каркасе промышленного здания

О.А. Туснина, А.А. Колчанов

Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет

Аннотация: В данной статье рассматривается проблематика определения коэффициентов динамичности при локальном повреждении стропильной фермы в стальном каркасе промышленного здания. Анализ устойчивости стальных каркасов к локальным повреждениям — это важное направление в проектировании промышленных зданий, особенно тех, что относятся к категории повышенной ответственности. Повреждение отдельных элементов несущей системы может вызвать перераспределение усилий и привести к прогрессирующему обрушению. Одним из ключевых подходов к оценке поведения конструкции в аварийной ситуации является определение коэффициентов динамичности, отражающих влияние мгновенного разрушения элементов на напряжённо-деформированное состояние каркаса. Исследование таких эффектов особенно актуально для зданий с мостовыми кранами, где действуют значительные динамические нагрузки. Наиболее достоверные результаты достигаются при использовании прямых динамических расчётов с учетом нелинейной работы конструкций, выполняемых в современных расчетных комплексах. Целью данной работы является определение коэффициентов динамичности при локальном разрушении нижнего пояса фермы, а также анализ зоны влияния этого разрушения на элементы стального каркаса одноэтажного промышленного здания.

Ключевые слова: прогрессирующее разрушение, коэффициент динамичности, стальной каркас, промышленное здание, аварийные ситуации, локальные повреждения.

Введение.

Проблема обеспечения несущей способности стальных каркасов промышленных сооружений при локальных повреждениях является весьма актуальной. Согласно нормам для промышленных сооружений повышенного уровня ответственности (класса КС-3) необходимо выполнять расчет на прогрессирующее обрушение. В соответствии с Федеральным законом ФЗ-384, к зданиям и сооружениям повышенного уровня ответственности относятся особо опасные, технически сложные и уникальные объекты.

Согласно Градостроительному кодексу РФ (статья 48.1), промышленные здания и сооружения, в которых осуществляется работа с опасными веществами; получают, транспортируются или используются

расплавы черных и цветных металлов, а также объекты, на которых ведутся горные работы являются опасными производственными объектами и имеют повышенный уровень ответственности.

Для обеспечения несущей способности каркаса при возникновении аварийных ситуаций из-за локальных повреждений конструкций выполняются следующие конструктивные мероприятия по защите каркаса от прогрессирующего разрушения (СП 385.1325800.2018):

- повышение статической неопределимости каркаса, за счет установки дополнительных элементов, включающихся в работу только при возникновении аварийной ситуации (п. 9.7, СП 385.1325800.2018);

- формирование статической схемы каркаса, обеспечивающей эффективное перераспределение усилий между несущими конструкциями после локального разрушения;

- обеспечение пластической работы конструкций и исключение хрупкого разрушения конструктивных элементов и их узлов, для чего рекомендуется использование сталей с относительным удлинением не менее 14% (п. 9.2.9, СП 385.1325800.2018).

Следует отметить, что большое количество промышленных сооружений, эксплуатируемых в составе опасных производств в нашей стране, были построены по нормам, которые не требовали обеспечения защиты от прогрессирующего разрушения. Каркасы таких сооружений выполнены по типовым проектам и не предусматривают специальных конструктивных мероприятий по защите от прогрессирующего разрушения [1-4].

Приведение конструктивных решений существующего каркаса в соответствие с требованиями действующих норм по защите от прогрессирующего разрушения является весьма затруднительным, а часто и

невозможным из-за ограниченного доступа к конструкциям, особенностей производственного процесса, протекающего в здании [5].

Проверка и расчетное обоснование несущей способности существующих типовых каркасов при локальном повреждении конструкций является важной прикладной задачей, возникающей при реконструкции, техническом перевооружении и модернизации производственных мощностей [6,7].

Как показывают опыт эксплуатации существующих каркасов и выполненные расчеты, типовые стальные каркасы промышленных сооружений с мостовыми кранами обладают достаточно высокой устойчивостью к прогрессирующему разрушению. Часто более опасными и определяющими несущую способность каркаса являются основные сочетания нагрузок [8].

Актуальным представляется выполнение расчетов устойчивости к прогрессирующему обрушению каркасов одноэтажных промышленных зданий с мостовыми кранами различной грузоподъемности и режима работы, для нескольких снеговых районов, при варьировании конструктивных параметров сооружения: пролета, шага колонн, отметки рельса, отсутствия или наличия подстропильных конструкций. Результаты расчета позволят получить данные о коэффициентах динамичности и включаемости, сведения по наиболее нагруженным конструкциям и их элементам («ключевым элементам») и прочим факторам [9].

На основе этого предполагается разработка практических рекомендаций по расчету каркасов промышленных сооружений на прогрессирующее разрушение.

Полученные данные могут использоваться для машинного обучения и разработки системы анализа каркаса, в том числе и его устойчивости к прогрессирующему разрушению на основе нейросетей.

Для получения корректных и достоверных результатов расчеты каркасов на прогрессирующее разрушение следует выполнять с учетом фактических условий работы конструкций и материалов, действия нагрузок, конструктивных решений. Для этого при расчетах следует учитывать:

- действительную пространственную работу каркаса и фактическое распределение усилий между несущими элементами;
- физически нелинейную работу материала и развития пластических деформаций стальных конструкций (физически нелинейный расчет);
- геометрически нелинейную работу конструкций в случае развития больших перемещений при повреждении каркаса, и включения отдельных конструкций в работу как элементов висячих систем (геометрически нелинейный расчет);
- динамические эффекты при исключении повреждаемого элемента из несущей системы (динамический расчет).

При необходимости и обеспечении конструктивной возможности восприятия возникающих усилий допускается учитывать включение в работу ограждающих конструкций (сдвиговые диски покрытия, стен и т.д.) [10].

Проблемы расчета на прогрессирующее разрушение.

Целями исследования в рамках статьи является анализ динамического эффекта при локальном повреждении нижнего пояса стропильной фермы промышленного здания с мостовыми кранами.

Задачи исследования в рамках статьи:

- анализ динамического эффекта при мгновенном разрушении элемента и коэффициентов динамичности для различных конструкций.
- определение наиболее ответственных конструктивных элементов, обеспечивающих защиту каркаса от прогрессирующего разрушения

Методы и материалы.

В рамках работы рассматривается стальной каркас одноэтажного промышленного здания с мостовыми опорными кранами на примере здания склада слябов металлургического комбината. Здание расположено в III снеговом районе и I ветровом районе. Пролет здания — 36 метров; шаг колонн — 12 метров; длина здания — 84 метра. Колонны ступенчатые, нижняя часть — двухветвевая: наружная ветвь из сварного швеллера объединяется с подкрановой ветвь из прокатного двутавра с помощью раскосной решетки из прокатных уголков. Верхняя часть колонны — сплошная из сварного двутавра. Стропильные конструкции представляют собой фермы с параллельными поясами из парных горячекатаных уголков. Материал конструкций — сталь С255. В здании на отметке +15.400 размещаются крановые пути мостовых кранов грузоподъемностью 80/20 тонн, режима работы 8К.

Расчет выполнялся с использованием программного комплекса Лира-САПР 2022. Конечно-элементная модель каркаса представлена на рис. 1. Рассматривалась аварийная ситуация, связанная с внезапным локальным повреждением наиболее нагруженной панели нижнего пояса стропильной фермы по оси 5. Повреждаемая ферма находится в основном связевом блоке.

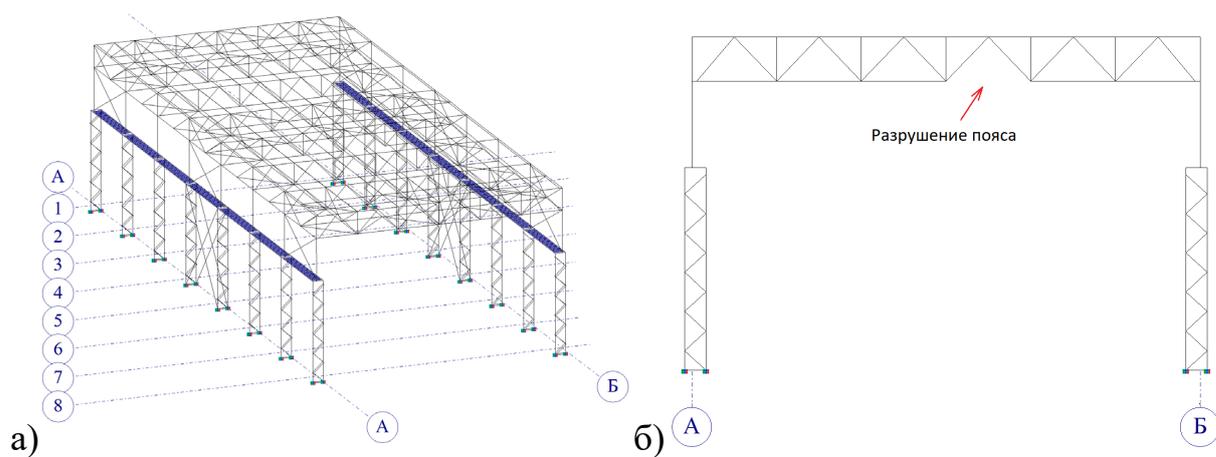


Рис. 1. Расчетная модель здания (Лира-САПР 2022)

а) общий вид; б) поперечная рама по оси 5

В соответствии с требованиями СП 385.132580.2018 расчет на

прогрессирующее разрушение выполняется на особое сочетание нагрузок, включающее нормативные постоянные и длительные временные нагрузки (табл. 1).

Табл. 1. Список загрузений

№	Наименование загрузки	Доля длительности	Комбинация*		
			C1	C2*	C3*
L1	Собственный вес несущих конструкций	1	1	1	1
L2	Постоянная от веса кровля	1	1	1	1
L3	Постоянная нагрузка от веса стен	1	1	1	1
L4	Снеговая нагрузка	0,5	1	1	-
L5	Полезная нагрузка на площадки	0,35	1	-	1
L6	Нагрузка от веса производственной пыли на площадках	1	1	-	1
L7	Нагрузка от веса производственной пыли на кровле	1	1	1	-
L8	Крановая вертикальная нагрузка	0,7	1	-	1

* расчет выполнялся на комбинацию загрузений C1, комбинации C2 и C3 – перспективные

Расчетная комбинация загрузений C1 включала в себя все временные длительные нагрузки, действующие на каркас: приложенные к покрытию здания (снеговая нагрузка, вес пыли на кровле), так и к колоннам (крановая нагрузка, полезная нагрузка и нагрузка от веса пыли на тормозных площадках). В дальнейшем для анализа влияния соотношения нагрузок на покрытие и колонны на динамический эффект будут рассмотрены отдельные комбинации, включающие только временные нагрузки на покрытие (комбинация C2) и только на колонны (комбинация C3).

Выполнялся прямой динамический расчет во времени с использованием расчетного модуля «Динамика во времени», который позволяет учитывать изменение нагрузок и реакций конструкции в зависимости от времени. Расчет проводился для стального каркаса, с учетом

характеристик стали: модуля упругости, плотности, предела текучести и коэффициентов демпфирования, влияющих на динамическое поведение конструкции.

Прогрессирующее разрушение моделировалось как нелинейная задача с использованием модуля «Прогрессирующее разрушение» (в динамической постановке). Моделирование разрушения панели нижнего пояса фермы при прогрессирующем разрушении выполнялось с использованием процедуры «Локальный отказ (динамика во времени)», время исключения элемента из работы принималось 0.1 с, что соответствует мгновенному разрушению [11]. Геометрически нелинейная задача решалась итерационным методом с автоматическим выбором шага с поиском новых форм равновесия.

Динамический расчет выполнялся методом прямого интегрирования уравнений движения. В результате динамического расчета были получены пиковые динамические перемещения, усилия и напряжения в конструкциях поврежденной схемы.

Выполненный динамически расчет позволяет наиболее точно оценить динамический эффект при мгновенном разрушении элемента. Однако выполнение такого расчета часто является весьма трудоемким и ресурсоемким, сопряжено с большими затратами машинного времени и памяти и не всегда возможно для решения практических задач. Поэтому при проектировании можно воспользоваться квазистатическим методом, при котором расчет выполняется в статической постановке, а учет динамики осуществляется с помощью коэффициента динамичности [12].

На величины коэффициентов динамичности влияют: место расположения элемента, скорость разрушения элемента, действующие в разрушаемом элементе усилия, конструктивные решения каркаса, характер, величины и распределение действующих на каркас нагрузок, параметры демпфирования материалов и т.д [13].

Анализ различных каркасов позволит выявить закономерности и дать рекомендации по назначению коэффициентов динамичности для различных каркасов при различных локальных повреждениях [14,15].

Для определения коэффициентов динамичности выполнялся статический расчет поврежденной системы. Полученные по итогам этого расчета результаты характеризуют распределение усилий по каркасу без учета внезапности разрушения.

Коэффициент динамичности (k_{dyn}) учитывает догружение конструкций каркаса за счет мгновенного локального разрушения и определяется следующим образом:

$$k_{dyn} = \frac{\sigma_{поврежденная, динамика}}{\sigma_{поврежденная, статика}} \quad (1)$$

где $\sigma_{поврежденная, динамика}$ - напряжения в элементе при динамическом расчете системы с локальным разрушением (с учетом внезапности разрушения); $\sigma_{поврежденная, статика}$ - напряжения в элементе при статическом расчете системы с локальным разрушением.

Результаты

Полученные в результате расчетов коэффициенты динамичности, для различных конструкций каркаса приведены в табл. 2-5 и в графическом виде на рис. 2 и 3. Маркировки элементов в табл. 2-5 – указаны на рис. 2-3.

Табл. 2. Коэффициенты динамичности в колоннах при повреждении нижнего пояса фермы по оси 5 (см. рис. 3)

Конструктивный элемент	Коэффициент динамичности в колоннах по оси							
	1	2	3	4	5	6	7	8
Нижняя часть	1.08	1.17	1.14	1.18	1.24	1.22	1.14	1.17
Верхняя часть	1.02	1.2	1.14	1.22	1.24	1.14	1.14	1.2

Табл. 3. Коэффициенты динамичности в связевых элементах по колоннам при повреждении нижнего пояса фермы по оси 5

Конструктивный элемент		Коэффициент динамичности в связях по колоннам в осях						
		1-2	2-3	3-4	4-5	5-6	6-7	7-8
Распорки (ряд А)	Нижний пояс (РС1к)	1	1	1	1.39	1.41	1.65	1
	Верхний пояс (РС2к)	1	1	1	1.08	1.64	1.68	1.1
Распорки (ряд Б)	Нижний пояс (РС1к)	1	1	1	1.48	1.45	1.43	1
	Верхний пояс (РС2к)	1	1	1	1	1.8	1.73	1.17
Связи по колоннам (ряд А)	ВС1	-	-	-	1.17	-	-	-
	ВС2	1	-	-	1.24	-	-	1.16
	ВС3к	1	-	-	1.69	-	-	1
Связи по колоннам (ряд Б)	ВС1	-	-	-	1.52	-	-	-
	ВС2	1	-	-	1.18	-	-	1.16
	ВС3к	1	-	-	1	-	-	1

Табл. 4. Коэффициенты динамичности в фермах при повреждении нижнего пояса фермы по оси 5 (см. рис. 2)

Конструктивный элемент	Коэффициент динамичности в фермах по оси							
	1	2	3	4	5	6	7	8
Верхний пояс	1.11	1.19	1.12	1.29	1	1.16	1.2	1.16
Нижний пояс	1	1.15	1.15	1.27	1.21	1.21	1.16	1.13
Опорные раскосы	1.17	1.17	1.1	1.25	1.23	1.14	1.1	1.17
Рядовые раскосы и стойки	1.14	1.14	1.13	1.3	1.29	1.16	1.13	1.14

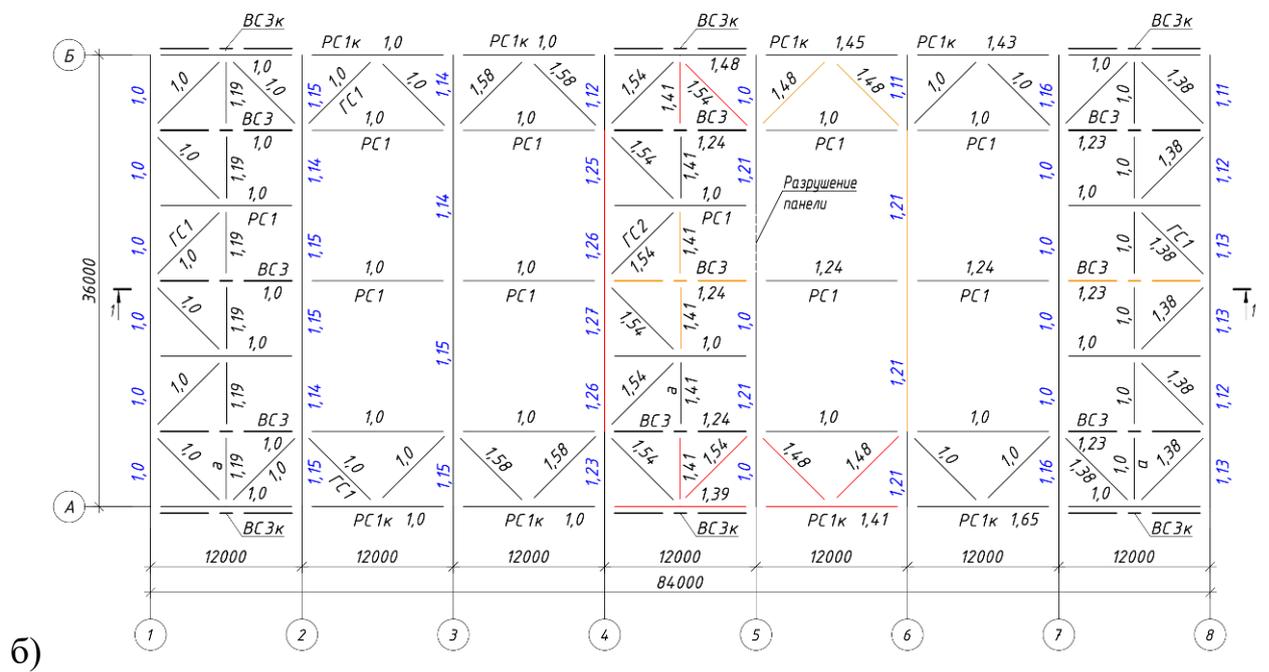
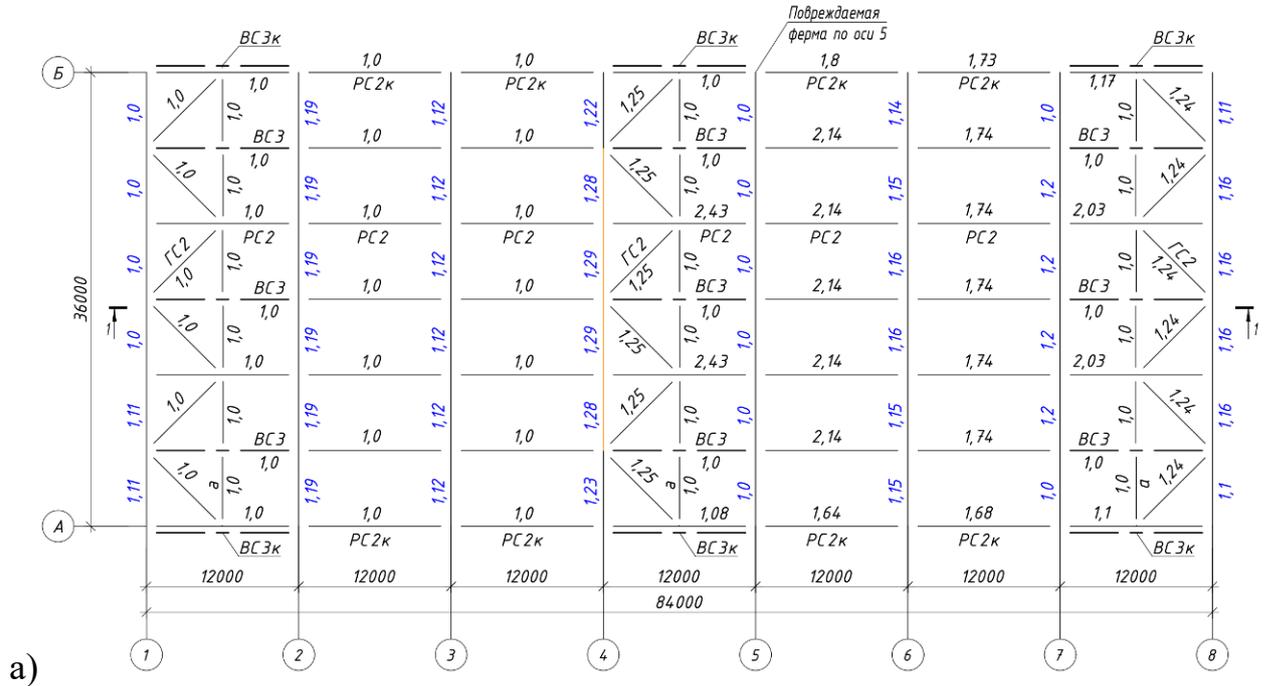
Табл. 5. Коэффициенты динамичности в конструкциях покрытия при повреждении нижнего пояса фермы по оси 5

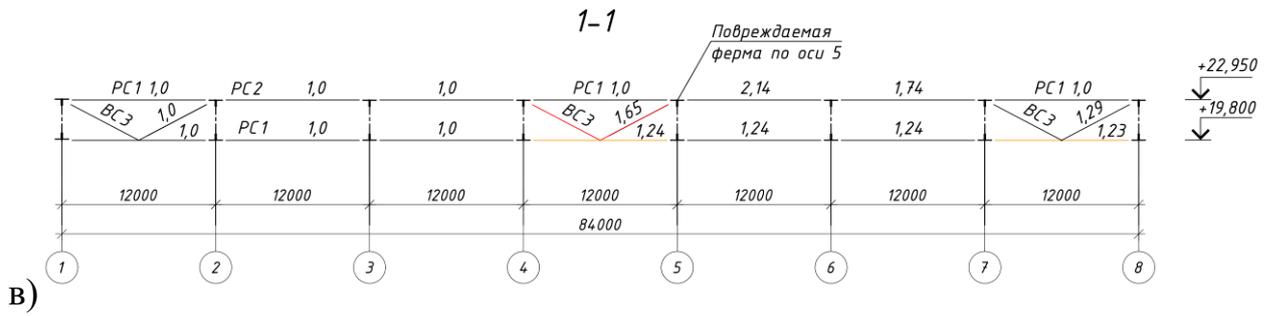
Конструктивный элемент		Коэффициент динамичности в конструкциях покрытия в осях						
		1-2	2-3	3-4	4-5	5-6	6-7	7-8
Связи по верхнему поясу	ГС2	1	-	-	1.25	-	-	1.24
	а	1	-	-	1	-	-	1
	РС2	1	1	1	2.43	2.14	1.74	2.03
Связи по нижнему поясу	ГС1	1	1	1.58	1.54	1.48	1	1.38
	а	1.19	-	-	1.41	-	-	1
	РС1	1	1	1	1	1.24	1.24	1
Вертикальные связи по фермам	Верхний пояс	1	-	-	1	-	-	1
	Раскосы	1	-	-	1.65	-	-	1.29
	Нижний пояс	1	-	-	1.24	-	-	1.23

На рис. 2-3 оранжевым и красным цветом, и в табл. 2-5 красным цветом помечены ключевые элементы - то есть такие конструкции, которые являются наиболее важными и ответственными для защиты каркаса от прогрессирующего разрушения.

При оценке степени ответственности конструкций учитывались следующие факторы: степень догружения элемента при повреждении каркаса по сравнению с его исходным напряженно-деформированным состоянием; общий уровень напряжений, действующих в элементе при расчете поврежденной системы с учетом динамики, степень загруженности элемента среди всех элементов одного типа сечения (марки конструкций), степень загруженности конструкции среди всех конструкций каркаса.

Ключевыми элементами принимались конструктивные элементы, у которых все названные факторы в совокупности дают наибольшее значение.

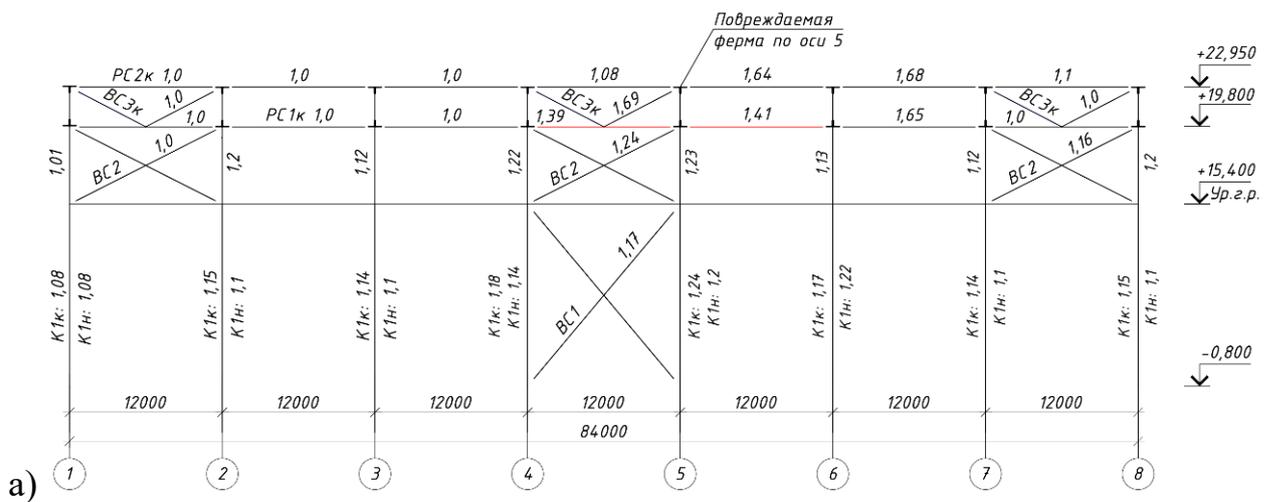




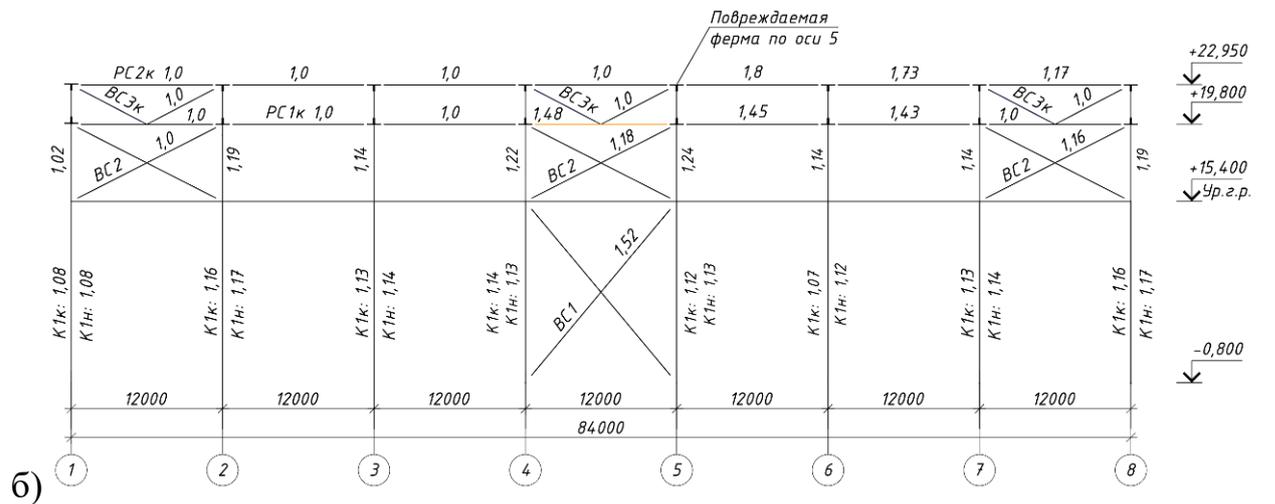
в)

Рис. 2. Коэффициенты динамичности в конструкциях каркаса

а) в уровне верхних поясов; б) в уровне нижних поясов ферм; в) разрез 1-1



а)



б)

Рис. 3. Коэффициенты динамичности в элементах каркаса а) ось А; б) ось Б;

Анализируя результаты выполненных расчетов, можно заключить следующее, что активно включаются в работу конструкции в соседних шагах от повреждаемой фермы по оси 5 (шаги 4-5 и 5-6). При чем более активно

включаются в работу и динамически догружаются конструкции в осях 5-8, что обусловлено влиянием крановой нагрузки, большая величина которой приходится на раму по оси 6 (см. рис. 2). В следствие этого большее усилие при разрушении уходит на конструкции связевого блока в осях 7-8, в то время как связи в осях 1-2 загружены не существенно;

- конструкции по нижнему поясу ферм более активно включаются в работу, чем по верхнему.

Выводы

1. Определены наиболее ответственные конструкции (ключевые элементы), обеспечивающие защиту от прогрессирующего разрушения каркаса одноэтажного промышленного здания с мостовыми кранами. Критерием отнесения элемента к ключевому являлась неблагоприятная совокупность факторов – существенное относительное увеличение усилия в элементе при повреждении каркаса, одновременно с высоким коэффициентом использования по несущей способности.

2. При внезапном локальном повреждении нижнего пояса фермы по оси 5 получено, что ключевые конструкции расположены в смежных шагах с повреждаемой фермой (оси 4-5 и 5-6) и приведены ниже в порядке от наиболее ответственного к менее:

3. - распорки по колоннам ряда А в уровне нижнего пояса ферм в осях 4-5 и 5-6 (коэффициент динамичности в среднем $k_{dyn} = 1.4$);

4. - продольные горизонтальные связи в осях 4-5 ($k_{dyn} = 1.54$) и 5-6 ($k_{dyn} = 1.48$)

5. - раскосы вертикальных связей по коньку ферм в осях 4-5 ($k_{dyn} = 1.65$)

6. - нижний пояс ферм по оси 4 ($k_{dyn} = 1.27$) и по оси 6 ($k_{dyn} = 1.27$)

7. Кроме этого, достаточно активно догружается нижний пояс

вертикальных связей по коньку ферм, в осях 7-8 ($k_{dyn} = 1.23$)

8. Установлено, что коэффициенты динамичности различны для разных конструкций и применение единого коэффициента для всего каркаса не является в достаточной степени корректным. В связи с этим для разных конструкций следует назначать свой коэффициент динамичности. При этом, учитывая, критичность ключевых элементов предлагается распространить коэффициенты динамичности, определенные для ключевых элементов на менее ответственные конструкции.

9. На основе анализа результатов в том числе в части включаемости в работу, коэффициенты динамичности для конструкций каркаса одноэтажного промышленного здания при внезапном локальном повреждении нижнего пояса фермы, входящей в связевой блок предлагается назначать следующими:

10. - пояса ферм по осям в смежных шагах с поврежденной (оси 4 и 6) - 1.3, пояса остальных ферм – 1.2; колонны – 1.25; распорки по нижним поясам ферм – 1.25; горизонтальные связи по нижним поясам ферм – 1.55; вертикальные связи по фермам – 1.65; вертикальные связи по колоннам – 1.25, распорки по колоннам – 1.4.

11. Коэффициенты динамичности применяются для учёта эффекта внезапного локального разрушения элементов каркаса и вводятся как поправочный множитель к напряжениям, полученным при статическом расчёте повреждённой системы. Для этого напряжения в элементах умножаются на соответствующий коэффициент динамичности, отражающий дополнительное догружение конструкций за счёт динамического эффекта. Такой подход позволяет учесть перераспределение усилий без выполнения трудоёмкого прямого динамического расчёта.

12. На величины коэффициентов динамичности и локализацию ключевых элементов оказывает влияние загрузка каркаса – более активно

включаются в работу и динамически догружаются конструкции у ряда А, на которые приложено максимальное крановое давление. Полученные результаты актуальны для сочетания нагрузок, включающего временные нагрузки по покрытию и вертикальную крановую нагрузку одновременно. В дальнейшем будут рассмотрены загрузки каркаса в отдельности только временными нагрузками по покрытию и только крановым давлением.

Литература

1. Колчунов В. И., Ключева Н. В., Андросова Н. Б., Бахтиярова А. С. Живучесть зданий и сооружений при запроектных воздействиях. – М.: АСВ, 2014. – 208 с.
2. Кравченко Г. М., Труфанова Е. В., Костенко Д. С. Анализ исследований прогрессирующего обрушения высотных зданий // Инженерный вестник Дона. – 2017. – № 3. – URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2017/4339.
3. Nethercot D. A. Design of building structures to improve their resistance to progressive collapse // Procedia Engineering. – 2011. – № 14. – pp. 1–13.
4. Ellingwood B. R., Smilowitz R., Dusenberry D. O., Duthinh D., et al. Best practices for reducing the potential for progressive collapse in buildings. – Gaithersburg, MD, USA: National Institute of Standards and Technology, 2007. – NISTIR 7396.
5. Алмазов В. О., Плотников А. И., Расторгуев Б. С. Проблемы сопротивления зданий прогрессирующему разрушению // Вестник МГСУ. – 2011. – № 2. – С. 16–20.
6. Закиева Н. И., Гранкина Д. В., Ким К. А., Васильева Д. К. Процесс прогрессирующего обрушения высотных зданий и анализ решений, противодействующих ему // Инженерный вестник Дона. – 2019. – № 3. – URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2019/5811.

7. Райзер В. Д. К проблеме живучести зданий и сооружений // Строительная механика и расчет сооружений. – 2012. – № 5. – С. 77–78.

8. Кудишин Ю. И. Концептуальные проблемы живучести строительных конструкций // Вестник МГСУ. – 2009. – № 2 (спец.). – С. 28–36.

9. Перельмутер А. В. Развитие требований к безотказности сооружений // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. – 2015. – № 1(48). – С. 81–101.

10. Бондарев Ю. В., Нгуиен Т. С. Расчет стержневых систем при внезапном удалении отдельных элементов // Строительная механика и расчет сооружений. – 2010. – № 4(231). – С. 43–48.

11. Туснина О. А., Колчанов А. А. Динамическое догружение конструкций поперечной рамы промышленного здания при локальном повреждении // Актуальные проблемы строительной отрасли и образования — 2023: сб. докл. IV Нац. науч. конф. (Москва, 15 дек. 2023 г.). – М.: Изд-во МИСИ-МГСУ, 2024. – С. 134–139.

12. Подшивалов И. И. Анализ результатов моделирования напряженного состояния колонн и связей экспериментального здания от прогрессирующего обрушения // Вестник ТГАСУ. – 2022. – № 3. – URL: cyberleninka.ru/article/n/analiz-rezultatov-modelirovaniya-napryazhennogo-sostoyaniya-kolonn-i-svyazey-eksperimentalnogo-zdaniya-ot-progressiruyuschego.

13. Туснин А. Р., Бергер М. П. Коэффициенты динамичности для большепролетных ферм с локальными разрушениями // Промышленное и гражданское строительство. – 2023. – № 5. – С. 17–24. – DOI: 10.33622/0869-7019.2023.05.17-24.

14. Туснин А. Р., Бергер М. П. Зависимость коэффициента динамичности от жесткости ферм при разных видах локальных разрушений // Вестник МГСУ. – 2023. – Т. 18, № 2. – С. 202–217. – DOI: 10.22227/1997-0935.2023.2.202-217.

15. Fedorova N. V., Vu N. T., Iliushchenko T. A. Dynamic additional loading of the frame of a multi-story building after the failure of one of the structures // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2020. – Vol. 896. – P. 012040. – DOI: 10.1088/1757-899X/896/1/012040.

References

1. Kolchunov V.I., Klyueva N.V., Androsova N.B., Bakhtiyarova A.S. Zhivuchest' zdaniĭ i sooruzhenĭ pri zaproektnykh vozdeystvijakh [Survivability of buildings and structures under beyond-design impacts]. M.: ASV, 2014. 208 p.
2. Kravchenko G.M., Trufanova E.V., Kostenko D.S. Inzhenernyj vestnik Dona. 2017. № 3. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2017/4339.
3. Nethercot D.A. Procedia Engineering. 2011. Vol. 14. pp. 1–13.
4. Ellingwood B.R., Smilowitz R., Dusenberry D.O., Duthinh D., et al. Best practices for reducing the potential for progressive collapse in buildings. Gaithersburg, MD, USA: National Institute of Standards and Technology, 2007. NISTIR 7396.
5. Almazov V.O., Plotnikov A.I., Rastorguev B.S. Vestnik MGSU. 2011. № 2. pp. 16–20.
6. Zakieva N.I., Grankina D.V., Kim K.A., Vasileva D.K. Inzhenernyj vestnik Dona. 2019. № 3. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2019/5811.
7. Rajzer V.D. Stroitel'naja mehanika i raschet sooruzhenĭ. 2012. № 5. pp. 77–78.
8. Kudishin Ju.I. Vestnik MGSU. 2009. № 2 (spets.) pp. 28–36.
9. Perel'muter A.V. Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta. 2015. № 1(48). pp. 81–101.
10. Bondarev Ju.V., Nguien T.S. Stroitel'naja mehanika i raschet sooruzhenĭ. 2010. № 4(231). pp. 43–48.



11. Tushina O.A., Kolchanov A.A. Aktual'nye problemy stroitel'noj otrasli i obrazovaniya. 2023. M.: Izd-vo MISI-MGSU, 2024. pp. 134–139.

12. Podshivalov I.I. Vestnik TGASU. 2022. № 3. URL: cyberleninka.ru/article/n/analiz-rezultatov-modelirovaniya-napryazhennogo-sostoyaniya-kolonn-i-svyazey-eksperimentalnogo-zdaniya-ot-progressiruyuschego.

13. Tusnin A.R., Berger M.P. Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo. 2023. № 5. pp. 17–24. DOI: 10.33622/0869-7019.2023.05.17-24.

14. Tusnin A.R., Berger M.P. Vestnik MGSU. 2023. Т. 18, № 2. pp. 202–217. DOI: 10.22227/1997-0935.2023.2.202-217.

15. Fedorova N.V., Vu N.T., Iliushchenko T.A. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2020. Vol. 896. P. 012040. DOI: 10.1088/1757-899X/896/1/012040.

Дата поступления: 21.04.2025

Дата публикации: 25.06.2025