

УДК 624.015.5

Количественная оценка риска прогрессирующего обрушения конструкций большепролетных сооружений

Тамразян А.Г., д.т.н., Степанов А.Ю., к.т.н.

НТЦ "Риск и безопасность сооружений", Управление КАСРР, Россия

Анотація. Чинні та розроблювані нормативні документи, засновані на концепціях конструктивної безпеки і пов'язані з виконанням вимог граничних станів. Вони не відображають всіх особливостей експлуатації конструкцій і не дозволяють оцінити живучість конструктивних систем, що запроектованих із помилками або знаходяться в незадовільних умовах експлуатації, а також піддаються впливам, не обумовленим у проекті. Програма управління ризиком зобов'язана забезпечити максимальний захист від ризику при мінімальних витратах.

Аннотация. Действующие и создаваемые нормативные документы основаны на концепциях конструктивной безопасности и связаны с выполнением требований предельных состояний. Они не отражают всех особенностей эксплуатации конструкций и не позволяют оценить живучесть конструктивных систем, за проектированных с ошибками или находящихся в неудовлетворительных условиях эксплуатации, а также подвергающихся воздействиям, не оговоренным в проекте. Программа управления риском обязана обеспечить максимальную защиту от риска при минимальных издержках.

Abstract. Normative documents in force and being created are founded on concept of constructive safety, and they are connected with fulfillment of requirements as to limiting states. They do not reflect all specific features of constructions under operation and do not allow to assess survivability of structural systems designed with mistakes or found in unsatisfactory operational conditions, as well as being subjected to influences not stipulated in the project. Program of risk control is aimed at provision of maximum protection against risk under minimum costs.

Ключевые слова: большепролетные сооружения, обрушение, риск.

Введение. Постановка проблемы. Большепролетные покрытия представляют собой достаточно широкий класс строительных конструкций. В первую очередь, это объекты общественного назначения – развлекательные и спортивные сооружения. Оценка риска при проектировании и эксплуатации таких сооружений является важной, законодательно утвержденной в промышленно развитых странах, процедурой количественного определения потенциальных опасностей, связанных с функционированием объекта.

Программа управления риском призвана обеспечить максимальную защиту от риска при минимальных издержках. Она включает в себя собственно оценку риска, выбор таких мер, которые максимально

предотвращают убытки, претворение этих мер в жизнь и контроль за их выполнением. Реализации положений программы управления риском и посвящена предлагаемая статья.

Цель работы. Цель работы – определение количественных показателей риска прогрессирующего обрушения конструкций большепролетных сооружений.

Основная часть. Действующие и создаваемые нормативные документы, при всех положительных моментах, основаны на концепциях конструктивной безопасности, т.е. связаны с выполнением требований предельных состояний. Они не отражают всех особенностей напряженно-деформированного состояния во время эксплуатации конструкций, в том числе внезапные запроектные воздействия и, следовательно, не позволяют достаточно строго оценить живучесть конструктивных систем, запроектированных с ошибками в расчетах, а также аварийными и другими чрезвычайными ситуациями и воздействиями.

Оценка риска при проектировании и эксплуатации уникальных большепролетных сооружений является важной, законодательно утвержденной в промышленно развитых странах, процедурой количественного определения потенциальных опасностей, связанных с функционированием объекта.

Программа управления риском призвана обеспечить максимальную защиту от риска при минимальных издержках. Она включает в себя:

- оценку риска;
- выбор таких мер, которые максимально предотвращают убытки;
- претворение этих мер в жизнь и контроль за их выполнением.

Как правило, при разработке мероприятий по обеспечению безопасности большепролетных сооружений большое внимание уделяется системному подходу к проблеме и учету разнообразных факторов, влияющих на показатели риска. В общем виде под анализом риска подразумевается процесс выявления и оценки возможных негативных последствий в результате возникновения нарушений в работе конструктивной схемы сооружения и представления этих последствий в количественных показателях.

Анализ причин аварий проведен на основе материалов Главгосархстройнадзора России. Причинами аварий, как правило, являются ошибки при проектировании, просчеты в определении нагрузок, неудачные конструктивные решения связей, неправильный выбор стали для конкретных конструкций и условий строительства. К числу наиболее часто встречающихся дефектов относятся:

- неэквивалентная замена материала (класса стали, сечений элементов);
- изменение проектных размеров конструкций в целом и отдельных элементов;
- смещение осей от проектных геометрических центров узлов;
- дефекты изготовления и монтажа – погиби элементов, подрезы металла при сборке, неправильные соединения в монтажных узлах, отсутствие пространственной жесткости в процессе монтажа;
- непроектное приложение нагрузки.

Важным элементом анализа риска является идентификация возможных нарушений, которые могут привести к негативным последствиям. Выраженный в наиболее общем виде процесс анализа риска может быть представлен как ряд последовательных действий, связанных с:

- идентификацией возможных событий;
- определением вероятности их возникновения;
- выявлением вероятных негативных последствий (по возможности, количественных оценок).

Исходя из приведенного анализа, выделим следующие возможные причины аварий:

- ошибки при проектировании стальной конструкции;
- дефекты при изготовлении;
- ошибки при монтаже.

Риск-анализ живучести покрытия при аварийных воздействиях производится на основе следующих положений:

- вероятность локального разрушения – функция количества и сочетаний выхода из строя несущих конструкций;
- вероятность прогрессирующего обрушения – функция локальных разрушений;
- время от начала локальных разрушений до прогрессирующего обрушения должно обеспечить спасение и эвакуацию людей;
- индивидуальный риск (чел.смертей/год) – принимается при локальных разрушениях;
- социальный риск (чел.смертей/год) – принимается при прогрессирующем обрушении.

Программы, моделирующие ход аварий и их последствия, позволяют рассчитывать вероятность этих аварий и предсказывать их последствия.

На основе сметной стоимости строительства конькобежного центра проведена оценка вероятного размера экономического ущерба от аварии основных элементов стальной конструкции.

Ущерб от аварии определяется по формуле:

$$P_0 = P_{\text{ПП}} + P_{\text{СЭ}} + P_{\text{К}} \quad (1)$$

где P_0 – полный ущерб, руб.; $P_{\text{ПП}}$ – прямые потери, руб.; $P_{\text{СЭ}}$ – социально-экономические потери (затраты, понесенные вследствие гибели и ранения людей), руб.; $P_{\text{К}}$ – косвенный ущерб, руб.

В качестве примера выполнен анализ и расчет на аварийные воздействия и риск прогрессирующего обрушения уникальной конструкций покрытия конькобежного центра в Крылатском в г. Москве (рис. 1).

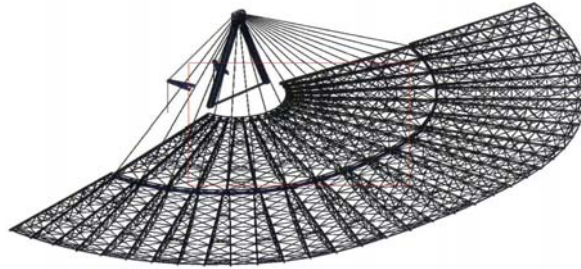


Рис. 1. Схема несущих конструкций покрытия конькобежного центра

Уникальный проект конструкции покрытия конькобежного центра в Крылатском представляет собой систему радиально расположенных ферм пролетом 50,4 м с верхним поясом из клееной древесины. Раскосы и нижний пояс выполнены из стальных труб. Фермы в центральной части пролета ледовой арены (~102 м) опираются на стальную полукольцевую балку. Балка подвешена в точках, близких к опорам ферм, за растянутые безизгибные ванты к Л-образной опоре. Общее количество вант – 19. Стальная опора высотой примерно 60 м оттягивается в противоположном направлении двумя заанкеренными в фундаменте стальными оттяжками. Объем фундамента составляет 4374 м³, а вес – 10 935 т.

Условные вероятности аварии по причинам отказа основных элементов стальной конструкции покрытия конькобежного центра определены методом анализа "дерева событий". Распределение условной вероятности аварии и возможных причин отказа основных элементов стальных конструкций показаны рис. 2 и 3.

Расчеты по определению значения ущерба от аварии проведены в безразмерном виде, приведенном к стоимости рассматриваемого объекта, C_0 .

Стоимость строительства конькобежного центра – 8122365 тыс. руб., $C = 8,1 \cdot 10^9$.

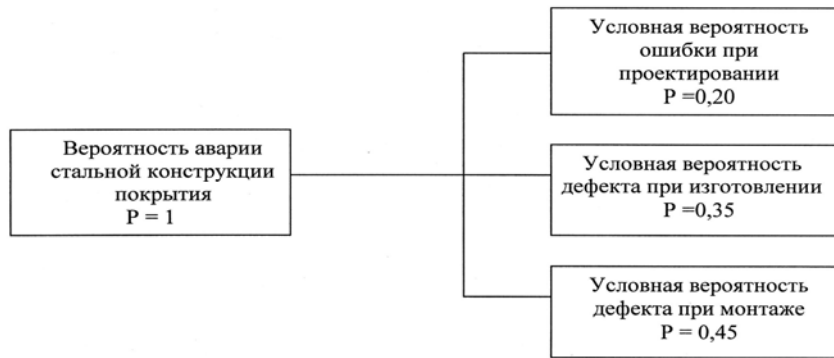


Рис. 2. Распределение условной вероятности аварии

Размер компенсационных выплат, связанных с гибелью человека $C_{\text{ч}}$, принимаем в соответствии с декларацией Российского научного общества анализа риска "Об оценке стоимости среднестатистической жизни человека", в которой предлагается возможный диапазон количественных значений стоимости среднестатистической жизни человека для современных условий России в пределах от 1,5 до 15 млн.руб. Для рассматриваемого случая принимаем $C_{\text{ч}} = 8000000$ руб. ($8 \cdot 10^6$ руб.). В безразмерном виде $C_{\text{ч}} = 0,98 \cdot 10^{-3} \cdot C_0$.

Косвенный ущерб может быть определен как убытки из-за недополучения прибыли. Годовая прибыль крытого конькобежного комплекса составляет 76331760 руб. в год, ежемесячная прибыль – в среднем 6360980 руб. В безразмерном виде $C_{\text{к}} = 0,78 \cdot 10^{-3} \cdot C_0 \cdot n$, где n – число месяцев простоя.

Рассматриваются различные сценарии отказов конструкций покрытия.

1. Отказ Л-образной опоры. При отказе Л-образной опоры возможно разрушение несущих элементов конструкции покрытия (вантовой системы, кольцевой балки, на которую опираются фермы Ф1 и Ф2), образование очага локального обрушения покрытия, разрушение оборудования арены и трибун, деформация покрытия ледового поля. При ликвидации последствий аварии и восстановлении пострадавшего объекта потребуются:

- расчистка территории (для приведения территории в состояние, пригодное для проведения восстановительных работ);
- разборка, демонтаж конструктивных элементов;
- изготовление и монтаж новой конструкции покрытия;
- восстановление систем и оборудования;

- привлечение дополнительной строительной техники и оборудования, рабочей силы.

Период ликвидации последствий аварии и восстановления объекта может составить 2 года. Таким образом, возможный косвенный ущерб $C_k = 18,72 \cdot 10^{-3} \cdot C_0$.

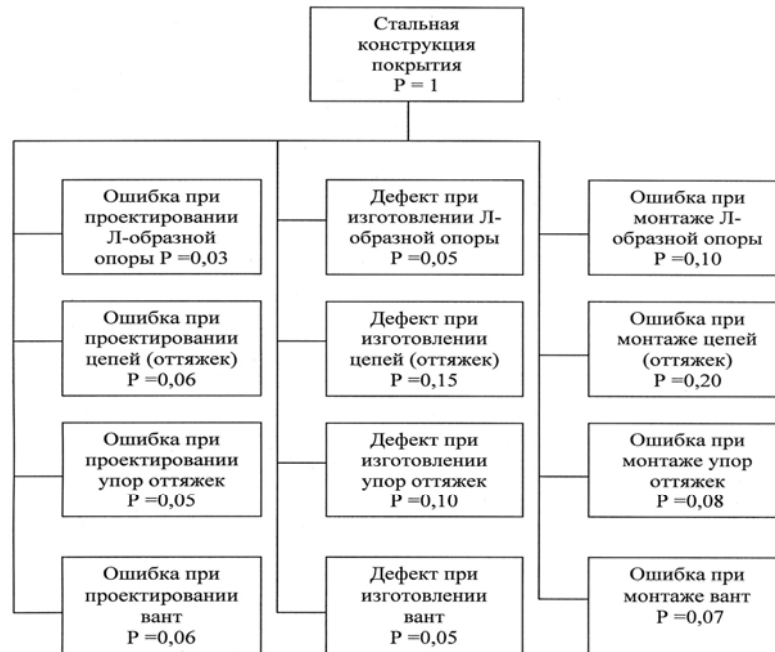


Рис. 3. Распределение условной вероятности отказа основных элементов стальной конструкции покрытия

2. Отказ одной из цепей оттяжек. При отказе одной из оттяжек возможна деформация каркаса покрытия. При ликвидации последствий аварии и восстановлении пострадавшего объекта потребуются:

- подготовка территории строительства;
- разборка, демонтаж конструктивных элементов;
- изготовление и монтаж новых элементов;
- привлечение дополнительной строительной техники и оборудования, рабочей силы.

Период ликвидации последствий аварии и восстановления объекта может составить 1 год. Поэтому возможный косвенный ущерб $C_k = 9,36 \cdot 10^{-3} \cdot C_0$. Аналогично определяется ущерб от отказа упора оттяжек и одной из вант.

Таблиця 1

Величина ущерба от отказа элементов конструкций покрытия

Вид ущерба	Элементы конструкции покрытия			
	Отказ Л-образной опоры	Отказ одной из цепей оттяжек	Отказ одного из упоров оттяжек	Отказ одной ванты
Прямые потери	$60 \cdot 10^{-3} C_0$	$2,5 \cdot 10^{-3} C_0$	$10 \cdot 10^{-3} C_0$	$50 \cdot 10^{-3} C_0$
Социально-экономические потери	$(300+0,07 \cdot 700) \cdot 10^{-3} C_0$	$(0,07 \cdot 10) \cdot 0,98 \cdot 10^{-3} C_0$	$(10+0,07 \cdot 50) \cdot 0,98 \cdot 10^{-3} C_0$	$(0,07 \cdot 20) \cdot 0,98 \cdot 10^{-3} C_0$
Косвенный ущерб	$18,72 \cdot 10^{-3} C_0$	$9,36 \cdot 10^{-3} C_0$	$1,25 \cdot 9,36 \cdot 10^{-3} C_0$	$9,36 \cdot 10^{-3} C_0$
Полный ущерб	$420,72 \cdot 10^{-3} C_0$	$12,62 \cdot 10^{-3} C_0$	$34,9 \cdot 10^{-3} C_0$	$60,8 \cdot 10^{-3} C_0$
Примечание. Максимальное количество погибших 300 чел., 700 чел. получат ранение различной степени тяжести; стоимость лечения – в размере 7 % от $C_ч$				

Обобщение оценок риска и ранжирование причин аварии по степени риска реализации угроз приведены в табл. 2.

Анализ показывает, что наибольший риск проявляется при выходе из строя Л-образной опоры, особенно при монтаже. Далее по степени опасности – это отказ вант и оттяжек.

Анализ потерь также показывает, что компенсационные выплаты, связанные с гибелью человека, намного превосходят остальные виды ущерба.

Исходя из этих данных, можно предложить следующие рекомендации по уменьшению ущерба:

1. Л-образную опору усилить контрфорсами, разгрузив тем самым две стальные оттяжки. Выход из строя оттяжек будет временно компенсироваться работой контрфорса, и потенциальный ущерб может быть уменьшен на порядок. Стоимость контрфорса примерно равна (3–4) $C_ч$.

2. При выходе из строя вант произойдет локальное разрушение. Чтобы уменьшить вероятность этого разрушения предлагается усилить поперечные связи жесткости, расположенные между фермами, так, чтобы при выходе из строя ванты освобожденная ферма опиралась на эти связи без разрушения и передала нагрузку на соседние фермы и далее на ванты. Стоимость несущих связей жесткости оценивается как 1,25 от стоимости самих связей. Стоимость связей эквивалентна стоимости фермы, а та, в свою очередь, равна примерно $1C_ч$. Т.е., стоимость дополнительных поперечных связей жесткости, поддерживающих ферму при выходе из строя ванты, равна $1,25C_ч$.

Таблиця 2

Уровни риска при реализации угроз в конструкциях покрытия

Причина аварии	Элемент стальной конструкции	Условная вероятность	Ущерб	Риск	Ранг
Ошибка при проектировании	Л-образная опора	0,03	$420,72 \cdot 10^{-3} C_0$	$12,6 \cdot 10^{-3} C_0$	3
	оттяжки	0,06	$12,62 \cdot 10^{-3} C_0$	$0,8 \cdot 10^{-3} C_0$	12
	упоры оттяжек	0,05	$34,9 \cdot 10^{-3} C_0$	$1,7 \cdot 10^{-3} C_0$	11
	ванты	0,06	$60,8 \cdot 10^{-3} C_0$	$3,6 \cdot 10^{-3} C_0$	5
Дефект при изготовлении	Л-образная опора	0,05	$420,72 \cdot 10^{-3} C_0$	$21 \cdot 10^{-3} C_0$	2
	оттяжки	0,15	$12,62 \cdot 10^{-3} C_0$	$1,9 \cdot 10^{-3} C_0$	10
	упоры оттяжек	0,10	$34,9 \cdot 10^{-3} C_0$	$3,49 \cdot 10^{-3} C_0$	6
	ванты	0,05	$60,8 \cdot 10^{-3} C_0$	$3,04 \cdot 10^{-3} C_0$	7
Ошибка при монтаже	Л-образная опора	0,1	$420,72 \cdot 10^{-3} C_0$	$42,07 \cdot 10^{-3} C_0$	1
	оттяжки	0,2	$12,62 \cdot 10^{-3} C_0$	$2,52 \cdot 10^{-3} C_0$	9
	упоры оттяжек	0,08	$34,9 \cdot 10^{-3} C_0$	$2,79 \cdot 10^{-3} C_0$	8
	ванты	0,07	$60,8 \cdot 10^{-3} C_0$	$4,26 \cdot 10^{-3} C_0$	4

Общая стоимость предлагаемых мероприятий по обеспечению безопасности конструкций покрытия конькобежного центра составляет:

- 2 контрфорса – $8C_ч$;
 - 56 дополнительных поперечных связей жесткости – $56 \cdot 1,25C_ч = 70 \cdot C_ч$.
- Всего: $78 \cdot C_ч$ или $78 \cdot 0,98 \cdot 10^{-3} C_0 = 76 \cdot 10^{-3} C_0$.

Выводы

Выполненный анализ показывает, что антирисковые мероприятия в размере 8 % от стоимости объекта уменьшают риск обрушения с $12,6 \cdot 10^{-3} C_0$ до $0,80 \cdot 10^{-3} C_0$ т.е. в 16 раз. Реальный ущерб при этом сокращается с $420,72 \cdot 10^{-3} C_0$ до $12,62 \cdot 10^{-3} C_0$, т.е. в 34 раза.

Такие мероприятия будут востребованы и эффективны как при ошибках при проектировании, наличии дефектов при изготовлении, так и при ошибках при монтаже, а также при несанкционированных воздействиях.

Надійшла до редколегії 15.07.2008 р.